

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

**Кафедра микропроцессорной техники
и информационно-управляющих систем**

С. Ф. ЕРМАКОВ, В. Е. МИНИН, Г. С. ГАВРИЛОВ

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

**Лабораторный практикум
по дисциплине «Электронные устройства»**

Гомель 2008

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра микропроцессорной техники
и информационно-управляющих систем

С. Ф. ЕРМАКОВ, В. Е. МИНИН, Г. С. ГАВРИЛОВ

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Лабораторный практикум
по дисциплине «Электронные устройства»

Одобен методической комиссией электротехнического факультета

Гомель 2008

УДК 621.382.33
ББК 32.852.3
Е72

Рецензент – канд. техн. наук, доцент М. Л. Шишаков (УО «БелГУТ»).

Ермаков, С. Ф.

Е72 Биполярные транзисторы : лабораторный практикум по дисциплине «Электронные устройства» / С. Ф. Ермаков, В. Е. Минин, Г. С. Гаврилов ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2008. – 72 с.

ISBN 978-985-468-366-9

Приведены краткие теоретические сведения и порядок проведения лабораторных исследований биполярных транзисторов и усилительных каскадов на их основе.

Предназначен для студентов специальности “Автоматика, телемеханика и связь на транспорте”.

УДК 621.382.33
ББК 32.852.3

ISBN 978-985-468-366-9

© Ермаков С. Ф., Минин В. Е., Гаврилов Г. С., 2008
© Оформление. УО «БелГУТ», 2008

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРАНЗИСТОРАХ

1.1 Классификация транзисторов

В числе электропреобразовательных полупроводниковых приборов, то есть приборов, служащих для преобразования электрических величин, важное место занимают транзисторы.

Транзистор представляет собой полупроводниковый прибор с одним или несколькими электрическими переходами, предназначенный для усиления или генерирования электрических сигналов, а также для коммутации электрических цепей, имеющих три или более выводов. Принцип действия транзистора основан на управлении движением носителей электрических зарядов в полупроводниковом кристалле. Название транзистор происходит от словосочетания «transfer resistor», что означает «регулируемое сопротивление».

Промышленность выпускает различные транзисторы, которые классифицируются по характеру переноса носителей, числу *p-n*-переходов, порядку чередования областей *p-n*-переходов, методам изготовления, мощности, диапазону частот и т. п.

По характеру переноса носителей заряда различают транзисторы *биполярные* и *полевые* (*униполярные*). В процессах токопрохождения биполярных транзисторов участвуют оба типа носителей зарядов – электроны и дырки (отсюда и название – биполярный), а полевых – носители одного знака.

По числу переходов транзисторы подразделяются на *одно-, двух- и многoperеходные*. Наиболее распространены транзисторы с двумя *p-n*-переходами и тремя выводами.

По порядку чередования областей *p-n*-переходов различают транзисторы *n-p-n* и *p-n-p* типов. Принцип действия обоих типов транзисторов одинаков.

По характеру распределения атомов примеси и движению носителей заряда транзисторы разделяют на *бездрейфовые* и *дрейфовые*. Бездрейфовые транзисторы имеют во всей базовой области одну и ту же концентрацию примеси. Вследствие этого в базе не возникает электрического поля и носители в ней совершают диффузионное движение от эмиттера к коллектору.

Скорость такого движения много меньше скорости дрейфа в ускоряющем поле. Таким образом, бездрейфовые транзисторы предназначены для более низких частот, нежели дрейфовые.

По предельной мощности, выделяемой в коллекторном переходе, различают транзисторы *малой* (до 0,3 Вт), *средней* (от 0,3 до 1,5 Вт) и *большой* (более 1,5 Вт) *мощности*.

В зависимости от предельной частоты транзисторы бывают *низкочастотными* (до 3 МГц), *среднечастотными* (от 3 до 30 МГц) и *высокочастотными* (свыше 30 МГц).

1.2 Система обозначений транзисторов

Система обозначений современных типов транзисторов установлена отраслевым стандартом ОСТ 11336.919-81. В основу системы обозначений положен буквенно-цифровой код (рисунок 1).

Первый элемент (цифра или буква) обозначает исходный полупроводниковый материал, на основе которого изготовлен транзистор. Для обозначения исходного материала используются следующие символы:

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

Второй элемент (буква) определяет подкласс (или группу) транзисторов. Для обозначения подклассов используется одна из двух букв: Т – биполярные и П – полевые транзисторы.

Третий элемент (цифра) – основные функциональные возможности транзистора. Для обозначения наиболее характерных эксплуатационных признаков транзисторов применяются цифры.

Для транзисторов малой мощности (максимальная мощность, рассеиваемая транзистором, не более 0,3 Вт):

1 – с граничной частотой коэффициента передачи тока или максимальной рабочей частотой (далее граничной частотой) не более 3 МГц;

2 – с граничной частотой 3–30 МГц;

3 – с граничной частотой более 30 МГц.

Для транзисторов средней мощности (0,3–1,5 Вт):

4 – с граничной частотой не более 3 МГц;

5 – с граничной частотой 3–30 МГц;

6 – с граничной частотой более 30 МГц.

Для транзисторов большой мощности (более 1,5 Вт):

7 – с граничной частотой не более 3 МГц;

8 – с граничной частотой 3–30 МГц;

9 – с граничной частотой более 30 МГц.

Четвертый элемент (число) обозначает порядковый номер разработки технологического типа транзистора, *пятый элемент* (буква) условно определяет классификацию по параметрам транзисторов, изготовленных по единой технологии.

Для обозначения порядкового номера разработки используют двухзначное число от 01 до 99. Если порядковый номер разработки превышает число 99, то применяется трехзначное число от 101 до 999.

В качестве классификационной литеры применяются буквы русского алфавита (за исключением З, О, Ч, Ы, Ш, Щ, Ю, Ъ, Ь, Э). Стандарт предусматривает также введение в обозначение ряда дополнительных знаков.

В качестве дополнительных элементов обозначения используют следующие символы:

цифры от 1 до 9 – для обозначения модернизаций транзистора, приводящих к изменению его конструкции или электрических параметров;

буква С – для обозначения наборов в общем корпусе (транзисторные сборки);

цифра, написанная через дефис, – для бескорпусных транзисторов:

1 – с гибкими выводами без кристаллодержателя;

2 – с гибкими выводами на кристаллодержателе;

3 – с жесткими выводами без кристаллодержателя;

4 – с жесткими выводами на кристаллодержателе;

5 – с контактными площадками без кристаллодержателя и без выводов;

6 – с контактными площадками на кристаллодержателе, но без выводов.

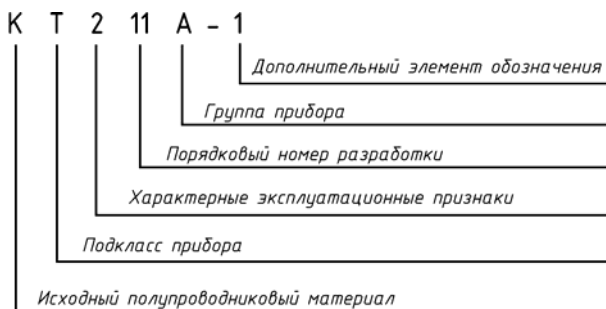


Рисунок 1 – Система обозначения транзисторов согласно ОСТ 11336.919-81

Например, КТ211А-1 – кремниевый (К) биполярный (Т), малой мощности, среднечастотный (2), номер разработки 11, группа А, бескорпусной, с гибкими выводами без кристаллодержателя.

Обозначение транзистора наносится на его корпус или дается в сопроводительной документации. Если обозначение транзистора нанесено на его корпус сокращенно в виде условных символов, цветных точек или дано в сопроводительной документации, то в справочном материале на транзистор это указывается особо.

Биполярные транзисторы, разработанные до 1964 г. и выпускаемые по настоящее время, имеют систему обозначений, включающую в себя два или три элемента.

Первый элемент обозначения – буква П или две буквы МП – для транзисторов в корпусе, герметизируемом способом холодной сварки.

Второй элемент – одно-, двух- или трехзначное число, которое определяет порядковый номер разработки и указывает на подкласс транзистора по роду исходного полупроводникового материала, допустимой рассеиваемой мощности и граничной частоте:

от 1 до 99 – германиевые маломощные низкочастотные;

101–199 – кремниевые маломощные низкочастотные;

201–299 – германиевые мощные низкочастотные;

301–399 – кремниевые мощные низкочастотные;

401–499 – германиевые высокочастотные и СВЧ маломощные;

501–599 – кремниевые высокочастотные и СВЧ маломощные;

601–699 – германиевые высокочастотные и СВЧ мощные;

701–799 – кремниевые высокочастотные и СВЧ мощные.

Третий элемент обозначения (у некоторых типов он может отсутствовать) – буква, условно определяющая классификацию по параметрам транзисторов, изготовленных по единой технологии.

Например, МП112 – кремниевый маломощный низкочастотный транзистор в корпусе, герметизируемом способом холодной сварки.

2 БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР

2.1 Устройство биполярного транзистора

Биполярный транзистор – это активный полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими $p-n$ -переходами и тремя выводами. Работа биполярного транзистора обеспечивается носителями зарядов двух типов – электронами и дырками.

Устройство биполярного транзистора показано схематически на рисунке 2. Он представляет собой пластину полупроводникового материала, в которой созданы три чередующиеся области (слои) с различной электропроводностью. Для транзистора $n-p-n$ -типа средняя область имеет дырочную электропроводность, а две крайние области – электронную. Для транзистора $p-n-p$ -типа средняя область имеет электронную электропроводность, а две крайние области – дырочную.

Средняя область транзистора называется *базой* (Б), одна крайняя область – *эмиттером* (Э), другая – *коллектором* (К). Таким образом, в транзисторе имеются два $p-n$ -перехода: *эмиттерный* – между эмиттером и базой и *коллекторный* – между коллектором и базой. Как правило, эмиттер является наиболее сильно легированной областью. Область базы должна быть

очень тонкой. Это является условием хорошей работы транзистора. К каждой области припаивают металлические выводы для включения транзистора в электрическую цепь.

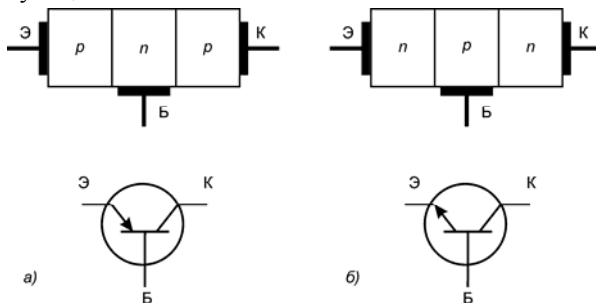


Рисунок 2 – Структуры биполярных транзисторов:
а – *p-n-p*-типа; б – *n-p-n*-типа

Для величин, относящихся к базе, эмиттеру и коллектору, применяют в качестве индексов буквы «б», «э» и «к». Токи в проводах базы, эмиттера и коллектора обозначают соответственно i_b , i_e , i_k . Напряжения между электродами обозначают двойными индексами, например, напряжение между базой и эмиттером $u_{б-э}$, между коллектором и базой $u_{к-б}$, между коллектором и эмиттером $u_{к-э}$. На условном графическом обозначении транзисторов *p-n-p* и *n-p-n* стрелка показывает условное (от плюса к минусу) направление тока в проводе эмиттера при прямом напряжении на эмиттерном переходе. На рисунке 3 представлено условное графическое обозначение транзистора *n-p-n*-типа. Условное графическое обозначение транзистора *p-n-p*-типа аналогично представленному на рисунке 3 за исключением направления стрелки.

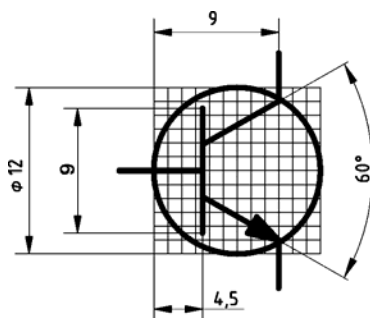


Рисунок 3 – Условно-графическое обозначение транзистора *n-p-n*-типа

Переходы база – эмиттер и база – коллектор работают как диоды, то есть при анализе работы схем биполярный транзистор можно мысленно представить в виде двух диодов, имеющих общую точку (рисунок 4). Такая схема

замещения является крайне упрощенной, так как степень взаимодействия между переходами транзистора значительно выше, чем взаимодействие между диодами с общей точкой. Для правильного понимания работы биполярного транзистора необходимо иметь в виду, что область базы очень тонкая, расстояние между эмиттерным и коллекторным переходами небольшое (составляет не более 10 мкм) и для его преодоления требуется небольшая энергия носителей заряда.

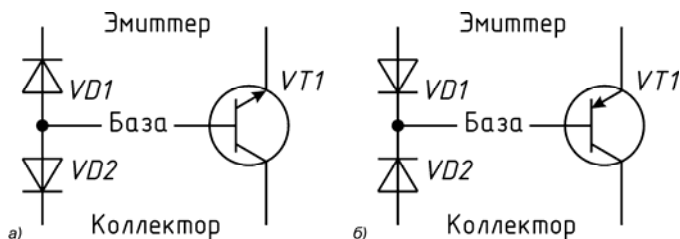


Рисунок 4 – Упрощенная схема замещения биполярных транзисторов: а – n-p-n-типа; б – p-n-p-типа

2.2 Принцип работы биполярного транзистора

Принцип работы транзистора заключается в том, что прямое напряжение эмиттерного перехода, то есть участка база – эмиттер ($u_{б-э}$), существенно влияет на токи эмиттера и коллектора: чем больше это напряжение, тем больше токи эмиттера и коллектора. При этом изменения тока коллектора лишь незначительно меньше изменений тока эмиттера. Таким образом, напряжение $u_{б-э}$, то есть входное напряжение, управляет током коллектора. Усиление электрических колебаний с помощью транзистора основано именно на этом явлении.

Если к эмиттерному переходу приложить прямое ($u_{б-э}$), а к коллекторному – обратное напряжения (рисунок 5), то через эмиттерный переход в область базы будут инжектироваться электроны, образуя эмиттерный ток транзистора $i_э$. Часть инжектированных в область базы электронов рекомбинирует с основными для этой области носителями заряда – дырками, образуя ток базы $i_б$. Другая часть инжектированных электронов, которая достигает коллекторного перехода, с помощью электрического поля, создаваемого напряжением $u_{к-б}$, подвергается экстракции в коллектор, образуя через переход коллекторный ток $i'_к$. Чем больше ток эмиттера, тем больше электронов приходит к коллекторному переходу и тем меньше становится его сопротивление и соответственно увеличивается ток коллектора. Ток коллектора связан с током эмиттера выражением

$$i'_к = \alpha i_э, \quad (1)$$

где α – коэффициент передачи тока эмиттера, $\alpha = 0,950 \dots 0,998$.

Таким образом, *эмиттером* следует называть область транзистора, назначением которой является инжекция носителей заряда в базу; *коллектором* – область, назначением которой является экстракция носителей заряда из базы. *Базой* является область, в которую инжектируются эмиттером неосновные для этой области носители заряда.

Через запертый коллекторный переход будет создаваться обратный ток $i_{к0}$, образованный потоком из коллектора в базу неосновных для коллекторной области носителей заряда (дырочек). Этот ток называется *начальным током коллектора* (или *неуправляемым током коллектора*) и измеряется при отключенном проводе эмиттера.

Таким образом, полный ток коллектора

$$i_k = i'_k + i_{к0} = \alpha i_3 + i_{к0}. \quad (2)$$

Во многих случаях $i_3 \gg i_{к0}$ и можно считать, что ток коллектора определяется выражением

$$i_k = \alpha i_3. \quad (3)$$

Разность между эмиттерным и коллекторным токами в соответствии с первым законом Кирхгофа представляет собой ток базы

$$i_6 = i_3 - i_k. \quad (4)$$

Заменив i_3 в (4) его значением из (3), получим

$$i_6 = i_k/\alpha - i_k = [(1 - \alpha)/\alpha] i_k.$$

Отсюда $i_k/i_6 = \alpha/(1 - \alpha) = \beta$ или

$$i_k = \beta i_6, \quad (5)$$

где β – коэффициент передачи тока базы ($\beta \gg 1$).

Согласно формуле (5) биполярный транзистор является усилительным элементом, управляемым током: малый ток базы управляет (преобразуется) значительно большим током коллектора.

При повышении напряжения на коллекторном переходе в нем происходит *лавинное размножение носителей заряда* (в результате ударной ионизации). Это явление и туннельный эффект способны вызвать электрический пробой, который при возрастании тока может перейти в тепловой пробой перехода. Электрический и тепловой пробой коллекторного перехода в транзисторе происходят в основном так же, как и в диоде. Но в

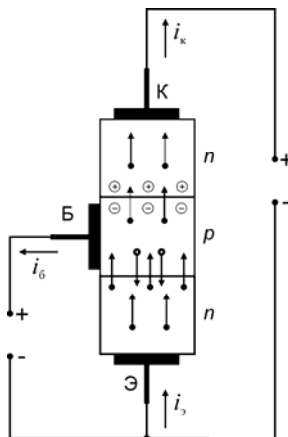


Рисунок 5 – Принцип работы транзистора

транзисторе при чрезмерном коллекторном токе может возникать тепловой пробой без предварительного электрического пробоя, то есть без повышения напряжения на коллекторном переходе до пробивного. Это явление, связанное с перегревом коллекторного перехода в какой-то его части, получило название *вторичного пробоя*.

Изменение напряжений на коллекторном и эмиттерном переходах сопровождается изменением толщины этих переходов. В результате изменяется толщина базы. Такое явление называют *модуляцией толщины базы*. Его особенно надо учитывать при повышении напряжения коллектор – база, так как тогда толщина коллекторного перехода возрастает, а толщина базы уменьшается. При очень тонкой базе может произойти эффект смыкания («прокол» базы) – соединение коллекторного перехода с эмиттерным. В этом случае область базы исчезает, и транзистор перестает нормально работать.

2.3 Режимы работы биполярного транзистора

В зависимости от полярности напряжений, приложенных к электродам транзистора, различают следующие режимы его работы: активный (линейный или усилительный), инверсный, насыщения и отсечки.

Активный режим – на эмиттерный переход подано прямое напряжение, а на коллекторный – обратное. Этот режим является основным режимом, так как при нем обеспечиваются максимальное значение коэффициента передачи тока эмиттера при минимальных искажениях усиливаемого сигнала, и транзистор работает как усилительный элемент. На выходной характеристике биполярного транзистора (рисунок 6, б) активному режиму соответствует линейная область.

Инверсный режим – к коллекторному переходу подведено прямое напряжение, а к эмиттерному – обратное. Исходя из реальной структуры несимметричного транзистора, этот режим работы приводит к значительному уменьшению коэффициента передачи тока эмиттера по сравнению с работой транзистора в активном режиме, и поэтому на практике применяется крайне редко.

Для симметричного транзистора (с одинаковыми площадями эмиттерного и коллекторного переходов) коллектор и эмиттер взаимозаменяемы. Инверсный режим работы такого транзистора используется в двунаправленных ключах.

Режим насыщения (двойной инжекции) – оба перехода (эмиттерный и коллекторный) находятся под прямым напряжением. Выходной ток в этом случае не зависит от входного и определяется параметрами нагрузки. Из-за малого напряжения между выводами коллектора и эмиттера (порядка единицы – десятки милливольт) этот режим используется для замыкания электрических цепей. На выходной характеристике биполярного транзистора (см. рисунок 6, б) режиму насыщения соответствует область, расположенная слева от линейной области.

Режим отсечки – к обоим переходам подведены обратные напряжения. Так как выходной ток транзистора в режиме отсечки практически равен нулю

и его сопротивление имеет максимальное значение, то этот режим используется для размыкания электрических цепей. На выходной характеристике биполярного транзистора (см. рисунок 6, б) режиму отсечки соответствует область, расположенная ниже характеристики, соответствующей $i_{вх} = 0$.

Транзисторные ключи находят широкое применение в различных электронных устройствах: измерительных усилителях для коммутации сигналов, в силовых преобразователях частоты и др. Во всех этих применениях транзистор попеременно переводится из режима насыщения в режим отсечки и обратно.

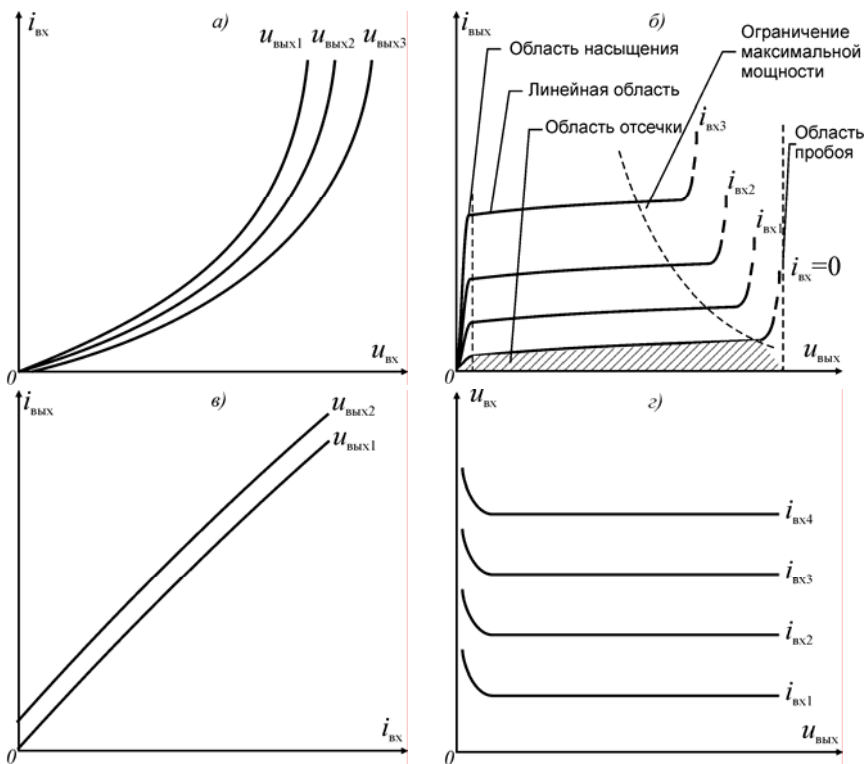


Рисунок 6 – Обобщенные статические характеристики биполярного транзистора:
 а – входная; б – выходная; в – прямой передачи; г – обратной связи

2.4 Статические характеристики

Биполярный транзистор при работе в электрических цепях рассматривают как активный четырехполюсник (рисунок 7), при этом образуются две цепи: входная и выходная.

Входная, или управляющая, цепь служит для управления работой транзистора. В выходной, или управляемой, цепи получают усиленные колебания. Источник усиливаемых колебаний включается во входную цепь, а в выходную включается нагрузка. Для величин, относящихся к входной и выходной цепям, применяют соответственно индексы «вх» и «вых» или «1» и «2».

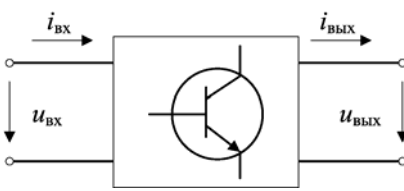


Рисунок 7 – Транзистор как активный четырехполюсник

Зависимости между токами и напряжениями (вольтамперные характеристики) в транзисторах выражаются *статическими характеристиками* транзисторов, снятыми при постоянном токе и отсутствии нагрузки в выходной цепи. Характеристики необходимы для рассмотрения свойств транзисторов и для практических расчетов транзисторных схем.

В транзисторе взаимосвязаны всегда четыре величины: $i_{вх}$, $i_{вых}$, $u_{вх}$, $u_{вых}$ – входные и выходные токи и напряжения. Для более точного определения свойств транзисторов необходимо несколько семейств статических характеристик:

$$\text{входных } i_{вх} = f(u_{вх}) \Big|_{i_{вых} = \text{const}}, \text{ выходных } i_{вых} = f(u_{вых}) \Big|_{i_{вх} = \text{const}};$$

$$\text{прямой передачи } i_{вых} = f(i_{вх}) \Big|_{u_{вх} = \text{const}}; \text{ обратной связи } u_{вх} = f(u_{вых}) \Big|_{i_{вх} = \text{const}}.$$

Обобщенный вид характеристик приведен на рисунке 6. Поскольку напряжения и токи транзисторов типов *n-p-n* и *p-n-p* имеют разные знаки (имеют противоположное друг другу направление), то иногда характеристики строят с учетом этого, то есть отрицательные значения напряжения и тока откладывают на осях влево и вниз. Но, как правило, удобнее отображать статические характеристики транзистора с осями вправо и вверх, причем полярность напряжений на транзисторе и направление токов в его цепях всегда определяются соответственно типу транзистора независимо от того, как изображены его характеристики.

Для каждой из трех схем включения транзистора существует свое семейство характеристик. Пользуясь характеристиками, необходимо обращать внимание к какой схеме они относятся (см. подразд. 2.6). Для однозначного установления зависимости между токами и напряжениями транзистора достаточно иметь два семейства характеристик (входных и выходных), остальные могут быть получены путем перестроения.

Входные и выходные характеристики аналогичны характеристикам полупроводникового диода и имеют ярко выраженный нелинейный характер. Входные характеристики относятся к эмиттерному переходу, который работает в активном режиме при прямом напряжении. Поэтому входные характеристики аналогичны характеристике прямого тока диода. Выходные характеристики подобны характеристике обратного тока диода, так как они отражают свойства коллекторного перехода, работающего при обратном напряжении.

Семейство входных характеристик (рисунок 6, а) выражает зависимость входного тока от входного напряжения при постоянном значении выходного напряжения. Значение выходного напряжения может увеличиваться как вправо ($u_{\text{вых}1} < u_{\text{вых}2} < u_{\text{вых}3}$), так и влево ($u_{\text{вых}1} > u_{\text{вых}2} > u_{\text{вых}3}$) в зависимости от конкретного вида схемы включения транзистора. Часть характеристик (при $u_{\text{вых}} > 0$) необязательно выходит из начала координат и может быть смещена по оси входного напряжения вниз. Наклон входной характеристики в любой рабочей точке определяет соответствующее значение входного сопротивления. Очевидно, что входные характеристики зависят от выходного напряжения. Анализ входных характеристик показывает, что при изменении выходного напряжения входное сопротивление меняется незначительно, но при изменениях входного напряжения изменяется в широких пределах. Типовые значения входного сопротивления для маломощных транзисторов в пределах от 500 до 2000 Ом.

Семейство выходных характеристик определяет взаимосвязь между выходным током и выходным напряжением при постоянном входном токе. Наклон кривых определяет выходную проводимость транзистора. Типовое значение выходной проводимости $50 \cdot 10^{-6}$ См. Первая характеристика ($i_{\text{вх}} = 0$) соответствует сквозному выходному току. Остальные характеристики расположены в порядке возрастания входного тока, то есть $i_{\text{вх}1} < i_{\text{вх}2} < i_{\text{вх}3}$. Ниже первой характеристики расположена область режима работы транзистора отсечки (заштрихованная область). Нелинейный участок в начале характеристик соответствует режиму насыщения, линейный участок – нормальному (активному) режиму работы транзистора (при этом выходной ток практически пропорционален входному). Характеристики могут быть смещены относительно оси выходного тока влево. Это также зависит от конкретной схемы включения транзистора.

На рисунке 6, б также приводится кривая, обозначающая максимально допустимую рассеиваемую коллектором мощность. Для исключения режима теплового пробоя режим работы транзистора следует выбирать ниже этой кривой. На рисунке 6, в также приводится линия, при достижении соответствующего выходного напряжения происходит электрический пробой.

Хотя для расчета схем с транзисторами достаточно иметь входные и выходные характеристики, иногда пользуются еще и характеристиками прямой передачи (или *характеристиками управления*). Эти характеристики выражают зависимость выходного тока от входного тока при постоянном выходном напряжении (то есть коэффициент передачи тока). Также иногда применяется зависимость выходного тока от входного напряжения. Как видно из рисунка 6, в эта зависимость близка к линейной. Изменение выходного напряжения мало влияет на выходной ток.

Помимо рассмотренных характеристик существуют еще характеристики обратной связи, которые показывают изменение напряжения на входе транзистора под влиянием изменения выходного напряжения при постоянном входном токе.

В транзисторах всегда присутствует внутренняя обратная связь. Это объясняется влиянием поперечного сопротивления базы, явлением модуляции

толщины базы, а также тем, что выходная и входная цепи электрически соединены. Характеристики обратной связи не применяются для расчетов и в дальнейшем не рассматриваются.

2.5 Параметры биполярных транзисторов

Статическими характеристиками транзисторов пользуются, как правило, для определения режимов работы транзисторных схем, а также для графического анализа этих схем в режиме большого сигнала. При аналитическом методе расчета применяют эквивалентные схемы транзисторов для переменного тока. Так как значения напряжений и токов переменных сигналов значительно меньше, чем постоянного, то такие эквивалентные схемы часто называют *малосигнальными*.

Малосигнальные эквивалентные схемы транзистора, представляющие собой линейные цепи, подразделяют на две большие группы:

- эквивалентные схемы, построенные с учетом физических свойств структуры и геометрии транзистора (модели транзистора);
- эквивалентные схемы активного линейного четырехполюсника (формальные эквивалентные схемы).

Первые характеризуются физическими параметрами транзистора (их еще называют *собственными*, или *первичными*, или *внутренними*), вторые – параметрами транзистора, как четырехполюсника (*характеристическими* или *вторичными* параметрами). Обе группы названных эквивалентных схем могут быть использованы при анализе транзисторных схем, работающих в активном режиме.

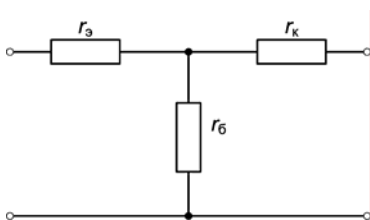


Рисунок 8 – Упрощенная Т-образная эквивалентная схема транзистора

Эквивалентная схема для области низких частот, содержащая параметры транзистора, может быть представлена для любой схемы включения транзистора (см. подразд. 2.6). На рисунке 8 представлена упрощенная Т-образная эквивалентная схема транзистора. Эта схема в известной мере отражает структурное сочетание составных элементов в транзисторе. Основными первичными параметрами являются сопротивления эмиттера, коллектора и базы переменному току.

Цепь базы транзистора представлена в эквивалентной схеме общим сопротивлением объема базы. Модуляция толщины базы отражается наличием в схеме коллекторного сопротивления. Эмиттерный переход отражен наличием соответствующего сопротивления.

Все системы вторичных параметров основаны на том, что транзистор рассматривается как активный четырехполюсник. Вторичные параметры

связывают входные и выходные переменные токи и напряжения и справедливы только для данного режима транзистора и для малых амплитуд.

2.5.1 Малосигнальные параметры

Основными низкочастотными малосигнальными параметрами считаются *смешанные* (или *гибридные*) параметры, обозначаемые буквой h или H .

В систему h -параметров входят следующие величины:

- *входное сопротивление* $h_{11} = \Delta u_{\text{вх}} / \Delta i_{\text{вх}}$ при $u_{\text{вых}} = \text{const}$ представляет собой сопротивление транзистора переменному входному току при коротком замыкании на выходе, то есть при отсутствии выходного переменного напряжения;
- *коэффициент обратной связи по напряжению* $h_{12} = \Delta u_{\text{вх}} / \Delta u_{\text{вых}}$ при $i_{\text{вх}} = \text{const}$ показывает, какая доля выходного переменного напряжения передается на вход транзистора вследствие обратной связи;
- *коэффициент усиления по току* $h_{21} = \Delta i_{\text{вых}} / \Delta i_{\text{вх}}$ при $u_{\text{вых}} = \text{const}$ показывает усиление переменного тока транзистором в режиме работы без нагрузки;
- *выходная проводимость* $h_{22} = \Delta i_{\text{вых}} / \Delta u_{\text{вых}}$ при $i_{\text{вх}} = \text{const}$ представляет собой внутреннюю проводимость для переменного тока между выходными зажимами транзистора. Величина h_{22} измеряется в сименсах (См). Часто пользуются выходным сопротивлением $R_{\text{вых}} = 1/h_{22}$, так как проводимость в практических расчетах применяется значительно реже, чем сопротивление.

Зависимость между переменными токами и напряжениями в транзисторе при использовании h -параметров можно выразить следующими уравнениями:

$$\begin{cases} u_{\text{вх}} = h_{11}i_{\text{вх}} + h_{12}u_{\text{вых}}, \\ i_{\text{вых}} = h_{21}i_{\text{вх}} + h_{22}u_{\text{вых}}. \end{cases} \quad (6)$$

Вышеприведенным уравнениям соответствует эквивалентная схема, изображенная на рисунке 9. Генератор ЭДС $h_{12}u_{\text{вых}}$ показывает наличие напряжения обратной связи во входной цепи. При этом генератор считается идеальным, то есть не имеющим внутреннего сопротивления. Генератор тока $h_{21}i_{\text{вх}}$ в выходной цепи учитывает эффект усиления тока, а h_{22} является внутренней проводимостью этого генератора. Хотя и входная и выходная цепи кажутся не связанными друг с другом, на самом деле эквивалентные генераторы учитывают взаимосвязь этих цепей.

Все h -параметры можно определить по статическим характеристикам. При этом параметры h_{11} и h_{12} определяются по входным, а h_{21} и h_{22} по выходным характеристикам. Не-

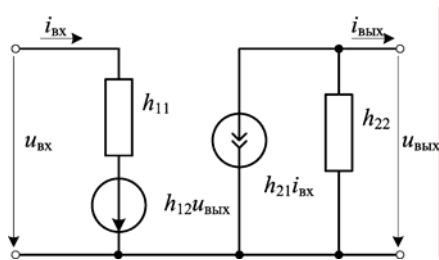


Рисунок 9 – Эквивалентная схема транзистора с использованием h -параметров

обходимо иметь в виду, что значения h -параметров зависят от схем включения транзистора. Для указания схемы включения к цифровым индексам h -параметров добавляется буквенный индекс: э – если транзистор включен по схеме с общим эмиттером, б – если транзистор включен по схеме с общей базой, и к – если транзистор включен по схеме с общим коллектором. Кроме того, приращения входных и выходных токов и напряжений нужно заменить приращениями напряжений и токов соответствующих электродов транзистора с учетом конкретной схемы включения.

Значения h -параметров зависят от режима транзистора, который определяется положением рабочей точки А. Если указано положение рабочей точки А на семействе статических входных характеристик (рисунок 10, а), то параметры h_{11} и h_{12} определяются следующим образом:

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta u'_{\text{ВХ}}}{\Delta i_{\text{ВХ}}} \right|_{u_{\text{ВЫХ}} = \text{const}} = \left. \frac{u'_{\text{ВХ}} - u''_{\text{ВХ}}}{i'_{\text{ВХ}} - i''_{\text{ВХ}}} \right|_{u_{\text{ВЫХ}0}} \quad (7)$$

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta u_{\text{ВХ}}}{\Delta u_{\text{ВЫХ}}} \right|_{i_{\text{ВХ}} = \text{const}} = \left. \frac{u_{\text{ВХ}1} - u_{\text{ВХ}2}}{u'_{\text{ВЫХ}} - u'_{\text{ВЫХ}}} \right|_{i_{\text{ВХ}0}} \quad (8)$$

Параметры h_{21} и h_{22} определяются в рабочей точке А по выходным характеристикам (рисунок 10, б) в соответствии с формулами:

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta i'_{\text{ВЫХ}}}{\Delta i_{\text{ВХ}}} \right|_{u_{\text{ВЫХ}} = \text{const}} = \left. \frac{i'_{\text{ВЫХ}} - i''_{\text{ВЫХ}}}{i'_{\text{ВХ}} - i''_{\text{ВХ}}} \right|_{u_{\text{ВЫХ}0}} \quad (9)$$

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta i_{\text{ВЫХ}}}{\Delta u_{\text{ВЫХ}}} \right|_{i_{\text{ВХ}} = \text{const}} = \left. \frac{i_{\text{ВХ}1} - i_{\text{ВХ}2}}{u''_{\text{ВЫХ}} - u'_{\text{ВЫХ}}} \right|_{i_{\text{ВХ}0}} \quad (10)$$

Параметры транзисторов, полученные из статических характеристик, могут быть использованы для расчетов только в диапазоне низких частот, где параметры транзисторов можно считать чисто активными и не зависящими от частоты.

2.5.2 Справочные параметры транзисторов

В справочниках приводятся два вида параметров: рабочие и предельные эксплуатационные параметры.

Рабочие параметры характеризуют работу транзистора в одном из режимов (см. подраздел 2.3), к ним относятся:

- коэффициенты передачи эмиттерного ($h_{21б}$) и базового токов ($h_{21э}$). Значение $h_{21б}$ составляет от 0,5 до 0,95; $h_{21э}$ – от десяти до тысячи единиц;
- дифференциальные сопротивления эмиттерного и коллекторного переходов $r_{э \text{ диф}}$ и $r_{к \text{ диф}}$. Сопротивление $r_{э \text{ диф}}$ относительно мало и составляет от единиц до десятков ом; значение $r_{к \text{ диф}}$ составляет от единиц до десятков килоом;

- постоянное напряжение коллектор – эмиттер $u_{к-э}$ при заданном токе коллектора i_k (от единиц до десятков вольт);
- обратный ток коллекторного перехода $i_{к-б0}$ при заданном обратном напряжении $u_{к-б0}$ (от нескольких наноампер до десятков миллиампер);
- напряжение насыщения коллектор – эмиттер $u_{к-э\text{ нас}}$ (от десятых долей до одного вольта);
- емкость коллекторного и эмиттерного переходов C_k и $C_э$ (от единиц до десятков пикофарад);
- предельная частота коэффициента передачи тока f_{h21} (от килоггерц до сотен мегагерц).

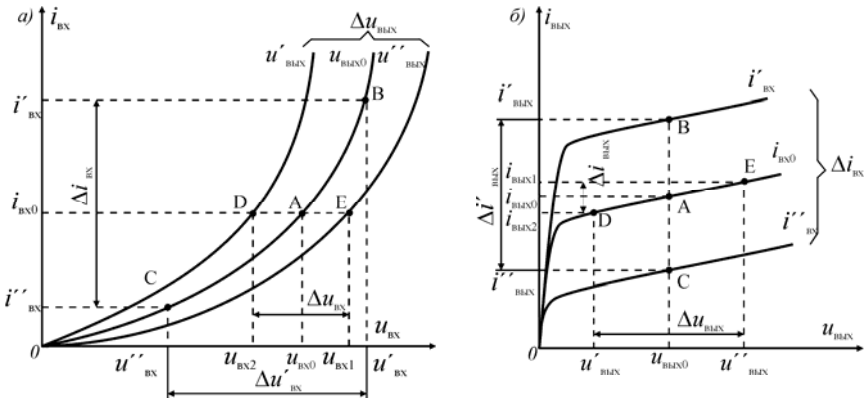


Рисунок 10 – Расчет h -параметров по входной и выходной характеристикам

Примечание – Для выбора рабочей точки на выходной характеристике необходимо построить *линию нагрузки* ($E_k = u_{к-э} + i_k R_n$) по заданным значениям напряжения питания коллекторного перехода E_k и сопротивления нагрузки R_n . Построение линии нагрузки производится по токам ее пересечения с осями координат: для выходного тока $i_k = E_k / R_n$ и для выходного напряжения $u_{к-э} = E_k$. Положение рабочей точки А выбирается на линейном участке характеристики. На входной ВАХ рабочая характеристика строится путем перенесения по точкам с выходной ВАХ.

2.5.3 Предельные режимы работы транзисторов

Предельно допустимые режимы работы транзисторов определяются максимально допустимыми напряжениями и токами, максимальной рассеиваемой мощностью и допустимой температурой корпуса прибора. Основными причинами, вызывающими выход транзистора из строя или нарушение нормальной работы схемы в результате изменения основных параметров транзисторов, могут быть: слишком высокое обратное напряжение на одном из переходов и перегрев прибора при увеличении тока через переходы.

В справочных данных на транзисторы обычно оговариваются предельные эксплуатационные параметры:

- максимально допустимые постоянное и импульсное напряжения коллектор – эмиттер $u_{к-э \text{ max}}$ и $u_{к-э \text{ и max}}$ (от десятков до сотен вольт);
- постоянный или импульсный ток коллектора $i_{к \text{ max}}$ или $i_{к \text{ и max}}$ (от десятков миллиампер до десятков ампер);
- постоянный или импульсный ток базы $i_{б \text{ max}}$ или $i_{б \text{ и max}}$ (от микроампер до десятков миллиампер);
- постоянная или импульсная рассеиваемая мощность коллектора $P_{к \text{ max}}$ или $P_{к \text{ и max}}$ (от милливатт до десятков ватт);
- предельная температура перехода $T_{п \text{ max}}$ или корпуса прибора $T_{к \text{ max}}$ (до сотен градусов Цельсия).

Все перечисленные параметры предельных режимов обусловлены развитием одного из видов пробоя: по напряжению – лавинного, току – токового или теплового, мощности – вызванного достижением максимальной температуры перехода.

Механизмы развития пробоев в транзисторах могут быть различными, однако независимо от этого все виды пробоев можно условно разделить на первичные и вторичные. *Первичные пробои* транзистора отличаются тем, что они являются обратимыми. Если транзистор попадает в режим первичного пробоя, то его нормальная работа нарушается, однако при выходе из режима пробоя его работоспособность восстанавливается. Любой *вторичный пробой* необратим, так как после него происходит деградация транзистора, обусловленная порчей переходов. Основными видами первичных пробоев являются: лавинный, тепловой и токовый.

Лавинный пробой иногда называют электрическим, так как он возникает при высоком значении напряжения обратно смещенного перехода.

Пробой в транзисторе имеет некоторые особенности, связанные с взаимным влиянием эмиттерного и коллекторного переходов. Пробивное напряжение коллектор – эмиттер всегда меньше пробивного напряжения коллекторного перехода. Это объясняется влиянием эмиттерного перехода на коллекторный. Если транзистор работает с отключенной базой (или в базе включено большое сопротивление), то ток коллектора будет неограниченно возрастать. В то же время пробой одного коллекторного перехода происходит при более высоком напряжении коллектор – база. Это явление объясняется тем, что при отключенной базе внутри транзистора действует положительная обратная связь. Заряды, образующиеся в результате лавинного размножения, скапливаются в базе, увеличивая ее заряд. Это вызывает приток неосновных носителей из эмиттера, которые увеличивают ток коллектора. Этот процесс нарастает лавинообразно и называется лавинным пробоем с эмиттерным умножением. На величину этой положительной обратной связи можно влиять схемным путем. Так, например, если подать на эмиттер транзистора запирающее напряжение, то его влияние резко уменьшается и пробивное напряжение увеличивается. Такой же эффект можно получить введением в цепь эмиттера

сопротивления, так как ток эмиттера, проходя по этому сопротивлению, создает напряжение отрицательной обратной связи и уменьшает действие эмиттера на лавинный процесс.

В большинстве применений, особенно для мощных транзисторов, рекомендуют между базой и эмиттером включать небольшое сопротивление R_6 .

Таким образом, в справочных данных транзистора можно найти три различных значения напряжений лавинного пробоя:

- напряжение $u_{к \rightarrow 0}$ – напряжение пробоя при отключенной базе ($i_b = 0$);
- напряжение $u_{к \rightarrow R} > u_{к \rightarrow 0}$ – напряжение пробоя при включении между базой и эмиттером сопротивления R_6 (при $R_3 = 0$);
- напряжение $u_{к \rightarrow к}$ – напряжение лавинного пробоя при базе, закороченной с эмиттером (при $R_6 = 0$). Все эти напряжения лавинного пробоя меньше напряжения пробоя перехода коллектор – база $u_{к-б \text{ проб}} > u_{к \rightarrow к} > u_{к \rightarrow R} > u_{к \rightarrow 0}$.

Тепловой пробой транзистора возникает вследствие лавинообразного нарастания температуры p - n -перехода. С ростом температуры перехода возрастают токи утечки и полупроводник переходит в проводящее состояние, а p - n -переход исчезает. Такое явление называют переходом кристаллов в состояние собственной проводимости.

В реальных условиях это явление не всегда ограничивает рост температуры, так как уже при более низких температурах может наблюдаться резкая зависимость от температуры одного или нескольких из основных параметров, например, коэффициента передачи тока или предельного рабочего напряжения.

Рассеяние мощности транзистором имеет место при любом режиме работы, однако оно максимально, когда транзистор находится во включенном состоянии или выключается. При высокой частоте коммутации потери растут пропорционально частоте. С увеличением потребляемой мощности растут и температура транзистора.

Для оценки теплового режима транзистора используют понятие *теплого сопротивления*, под которым понимают сопротивление элементов транзистора распространению теплового потока от коллекторного перехода к корпусу или в окружающую среду. Тепловое сопротивление $R_{т. п-к}$ между переходом и корпусом определяют как отношение разности температур перехода $T_{п}$ и корпуса $T_{к}$ к мощности $P_{пот}$, потребляемой транзистором.

Аналогично тепловое сопротивление переход – среда определяется как отношение разности температур перехода $T_{п}$ и окружающей среды $T_{с}$ к мощности потерь $P_{т. п-сг}$ в транзисторе.

Если в транзисторе протекает импульсный ток, то тепловое сопротивление будет зависеть от времени. В этом случае оно называется переходным и зависит от формы импульсов тока и момента времени, в который оно определяется.

В справочных данных на транзисторы обычно приводятся:

- тепловое сопротивление переход – корпус (или переход – среда) $R_{т. п-к}$;
- предельно допустимая температура перехода $T_{п \text{ макс}}$;

- предельная средняя (или импульсная) мощность потерь в транзисторе $P_{\text{пот max}}$;
- предельно допустимая температура корпуса прибора $T_{\text{к max}}$.

Температуру корпуса транзистора можно измерять непосредственно. Для этого на мощных приборах может быть указана точка, в которой следует производить это измерение. Непосредственно измерить температуру перехода транзистора в процессе эксплуатации практически невозможно. В связи с этим используют косвенные методы, основанные на температурной зависимости какого-либо параметра. Такие методы обычно не дают возможности определить температуру в наиболее горячих точках структуры, которые возникают из-за разброса электрофизических свойств кристалла или дефектов конструкции. Для определения усредненной температуры перехода используют тепловое сопротивление.

При температуре среды, равной $T_c = T_{\text{п max}}$, транзистор использовать практически невозможно, так как допустимая мощность потерь в нем равна нулю. Поскольку мощность, потребляемая транзистором, в основном расходуется на коллекторном переходе, то

$$P_{\text{пот max}} = u_{\text{к}} i_{\text{к}} = \text{const},$$

что определяет гиперболу максимальной потребляемой мощности, график которой приведен на рисунке 6, в.

Поскольку при постоянных значениях T_c и $R_{\text{т.п-с}}$ потребляемая транзистором мощность однозначно определяет температуру перехода, то гипербола максимальной потребляемой мощности является границей развития теплового пробоя.

Токовый пробой транзистора возникает при достижении током коллектора максимально допустимого значения.

На практике это значение тока никогда не достигается и обычно значение $i_{\text{к max}}$ определяется возможностью повреждения соединений (перегоранием проводников) внутри транзистора. Значение максимального допустимого тока $i_{\text{к max}}$ обычно указывается в справочных данных транзистора.

В ряде случаев максимально допустимый ток транзистора определяется по снижению коэффициента передачи тока ниже определенного значения. Если токовый пробой не связан с перегоранием соединительных проводников, то он является обратимым.

Вторичный пробой транзистора возникает или после развития одного из видов первичного пробоя или непосредственно минуя развитие первичного пробоя. Непосредственное развитие вторичного пробоя происходит обычно в области сравнительно высоких напряжений на коллекторе и связано с развитием так называемого «токового шнура». При этом коллекторный ток резко возрастает и концентрируется в очень малой области коллектора, которая проплавляется и замыкает коллектор с базой. Вторичный пробой происходит при значениях тока и напряжения, меньших гиперболы максимальной мощности (см. рисунок 7, в).

Если транзистор работает в усилительном режиме, то развитие вторичного пробоя и возникновение токового шнура связано с потерей термической устой-

чивости, при которой увеличение тока в каком-либо месте структуры приводит к повышению ее температуры, а повышение температуры увеличивает ток. Этот процесс нарастает лавинообразно и приводит к проплавлению структуры.

Электрический и тепловой механизмы развития вторичного пробоя являются не единственными. В реальных транзисторах концентрация тока и развитие вторичного пробоя могут быть результатом наличия дефектов в кристалле, плохого качества пайки и др. Но какова бы ни была причина развития вторичного пробоя, результатом его является шнурование тока и локальный перегрев с проплавлением кристалла.

Для развития вторичного пробоя требуется определенное время, которое может составлять от 1 до 100 мкс. Это время называют временем задержки развития вторичного пробоя. Если время нахождения транзистора в опасном режиме меньше времени развития вторичного пробоя, то вторичный пробой не возникает. Поэтому при коротких длительностях импульсов тока в транзисторе вторичный пробой может и не развиваться. Исследования показали, что при развитии вторичного пробоя (во время задержки) в цепи базы могут возникать автоколебания сравнительно высокой частоты, которые могут быть использованы для предсказания опасного значения тока и защиты транзистора.

Область безопасной работы транзистора определяет границы интервала надежной работы транзистора без захода в область одного из видов пробоя. Обычно область безопасной работы (ОБР) строится в координатах $i_{к} = f(u_{кз})$. Различают *статическую* и *импульсную* ОБР. Статическая ОБР (рисунок 11, линия а) ограничивается участками: токового (1), теплового (2), вторичного (3) и лавинного пробоев (4). При построении ОБР в логарифмическом масштабе все ее участки имеют вид прямых линий.

Импульсная ОБР (рисунок 11, линия б) определяется максимальным импульсным током коллектора $i_{к и max}$ и максимальным импульсным напряжением пробоя $u_{кз и max}$. При малых длительностях импульсов на ней могут отсутствовать участки, обусловленные тепловым пробоем. При длительности импульса менее 1 мкс импульсная ОБР имеет только две границы $i_{к и max}$ и $u_{кз и max}$. При увеличении длительности импульса появляются участки, ограничивающие ОБР за счет развития вторичного (3) и теплового (2) пробоев.

Границы областей безопасной работы транзистора зависят от температуры его корпуса. С увеличением температуры корпуса транзистора границы ОБР, обусловленные тепловым пробоем, перемещаются влево. Границы ОБР, обусловленные лавинным или вторичным пробоями, практически от температуры не зависят.

2.5.4 Частотные свойства

Параметры транзистора зависят от режима работы и частоты усиливаемых сигналов. С повышением частоты усиление транзисторов снижается. У этого явления две главные причины. Во-первых, на более высоких частотах сказывается вредное влияние емкости коллекторного перехода. С ростом частоты

сопротивление емкости стремится к нулю и соответственно уменьшается ток в нагрузке. Вторая причина снижения усиления на более высоких частотах – отставание по фазе переменного тока коллектора от переменного тока эмиттера. Оно вызвано инерционностью процесса перемещения носителей через базу от эмиттерного перехода к коллекторному, также инерционностью процессов накопления и рассасывания заряда в базе. За счет сдвига на высоких частотах возрастает ток базы, а от этого снижается коэффициент усиления по току β .

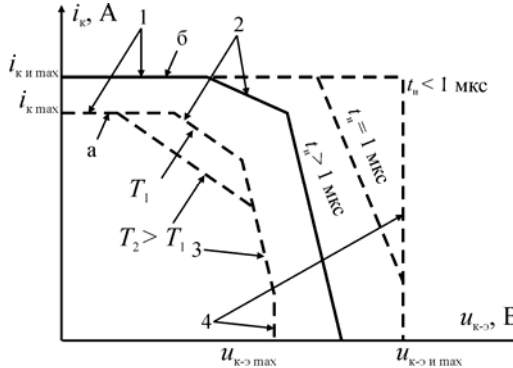


Рисунок 11 – Области безопасной работы биполярного транзистора

Таким образом, с увеличением частоты уменьшается абсолютная величина (модуль) коэффициента передачи тока базы $|h_{21\beta}|$. Частота, на которой $|h_{21\beta}|$ уменьшается в $\sqrt{2}$ раз или на 3 дБ по сравнению с его значением на низкой частоте, называют *предельной частотой передачи тока базы* $f_{h21\beta}$. Частота, на которой $|h_{21\beta}|$ уменьшается до 1, называется *границной* $f_{гр}$. При работе транзистора на частотах, превышающих $f_{h21\beta}$, его усилительные свойства уменьшаются вплоть до $f_{гр}$ (рисунок 12). На частотах, превышающих $f_{гр}$, транзистор вообще не усиливает. Величины $f_{h21\beta}$ и $f_{гр}$ позволяют судить о возможности работы транзистора в заданном диапазоне частот. Также из приведенного графика следует, что $f_{h21\beta} < f_{h21\beta}$, поэтому транзистор в схеме с ОБ обеспечивает усиление более высокочастотных сигналов.

По значению граничной частоты транзисторы подразделяются на *низкочастотные* (до 3 МГц), *среднечастотные* (от 3 до 30 МГц) и *высокочастотные* (свыше 30 МГц). Транзисторы, у которых $f_{гр} \geq 300$ МГц, называют сверхвысокочастотными.

Улучшение частотных свойств транзисторов достигается уменьшением емкости коллекторного перехода и времени пробега носителей через базу. Некоторое снижение емкости коллектора достигается уменьшением концентрации примеси в коллекторе. Для уменьшения времени пробега носителей через базу стараются сделать базу очень тонкой и увеличить скорость носителей в ней. Электроны при диффузии обладают большей подвижностью,

чем дырки. Поэтому транзисторы типа $n-p-n$ при прочих равных условиях являются более высокочастотными, нежели транзисторы типа $p-n-p$.

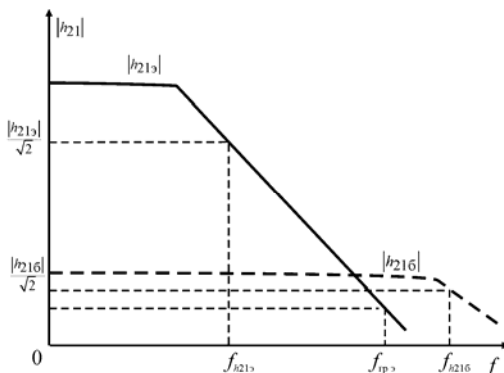


Рисунок 12 – Зависимость усиления транзистора от частоты

2.6 Основные схемы включения

Вне зависимости от типа транзистора ($n-p-n$ или $p-n-p$) применяют три основные схемы включения транзисторов в усилительные или иные каскады. Различие в способах включения зависит от того, какой из трех электродов транзистора является по переменному току общим для входной и выходной цепей каскада.

Основные схемы включения транзисторов называются соответственно схемами с *общими эмиттером* (ОЭ), *базой* (ОБ) и *коллектором* (ОК). Схемы представлены на рисунке 13.

Любая схема включения транзисторов в усилительных каскадах предполагает активный режим работы (то есть на эмиттерный переход подается прямое напряжение, на коллекторный – обратное). Так как схема усилительного каскада с ОК, изображенная на рисунок 13, в, предполагает инверсное включение транзистора, то на практике применяют схему с ОК, приведенную на рисунке 13, з, обеспечивающую нормальный режим работы транзистора.

В схеме с общей базой входные характеристики (рисунок 14, а) выражают зависимость тока эмиттера $i_э$ от напряжения на эмиттерном переходе $u_{э-б}$ при неизменном напряжении коллекторного перехода $u_{к-б}$ и соответствуют обычному ходу ВАХ диода при прямом включении. Это хорошо иллюстрируется характеристикой при $u_{к-б} = 0$, когда у транзистора работает только один $p-n$ -переход (эмиттерный). При $u_{к-б} > 0$ характеристика смещается вверх и влево, то есть возникает ток эмиттера, и при $u_{э-б} = 0$ протекает небольшой начальный ток эмиттера $i_{э0}$. Напряжение $u_{к-б}$ мало влияет на ход характеристики, так как электрическое поле, вызванное наличием напряжения $u_{к-б}$, почти не захватывает область эмиттерного перехода.

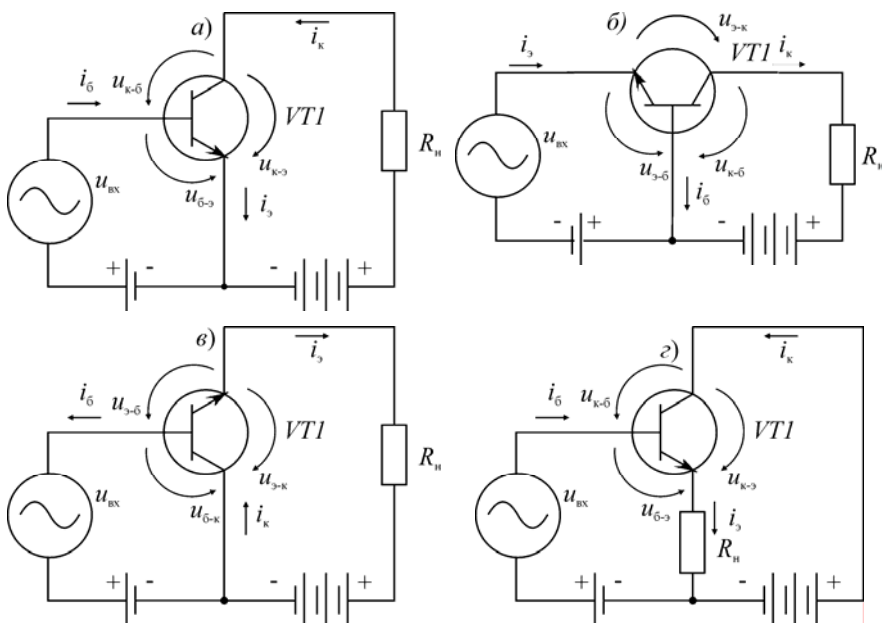


Рисунок 13 – Схемы включения транзистора с общими:
 а – эмиттером; б – базой; в – коллектором (инверсный режим работы);
 г – коллектором (нормальный (активный) режим работы)

Для каждой из трех схем включения транзистора существует свое семейство статических характеристик. В таблице 1 представлены статические характеристики для каждой из схем включения.

Таблица 1 – Статические характеристики для различных схем включения

Вид схемы	Ток		Напряжение		Статические характеристики			
	вход- ной	выход- ной	вход- ное	вы- ходное	входная	выходная	прямой передачи	обратной связи
ОЭ	$i_б$	$i_к$	$u_{б-э}$	$u_н$ ($u_{к-э}$)	$i_к = f(u_{б-э})$ при $u_{к-э} = \text{const}$	$i_к = f(u_{к-э})$ при $i_б = \text{const}$	$i_к = f(i_б)$ при $u_{к-э} = \text{const}$	$u_{бэ} = f(u_{кэ})$ при $i_б = \text{const}$
ОБ	$i_э$	$i_к$	$u_{э-б}$	$u_н$ ($u_{к-б}$)	$i_к = f(u_{э-б})$ при $u_{к-б} = \text{const}$	$i_к = f(u_{к-б})$ при $i_э = \text{const}$	$i_к = f(i_э)$ при $u_{к-б} = \text{const}$	$u_{э-б} = f(u_{к-б})$ при $i_э = \text{const}$
ОК	$i_б$	$i_э$	$u_{б-э}$	$u_н$ ($u_э$)	$i_б = f(u_{б-э})$ при $u_{к-э} = \text{const}$	$i_э = f(u_{к-э})$ при $i_б = \text{const}$	$i_э = f(i_б)$ при $u_{к-э} = \text{const}$	$u_{бэ} = f(u_{кэ})$ при $i_б = \text{const}$

Выходные характеристики транзистора в схеме с общей базой (рисунок 14, б) выражают зависимость тока коллектора $i_к$ от напряжения $u_{к-б}$ на коллекторном переходе при определенной величине тока эмиттера $i_э$. При $i_э = 0$ выходная характеристика выражает обычную зависимость тока диода от приложенного в обратном направлении напряжения.

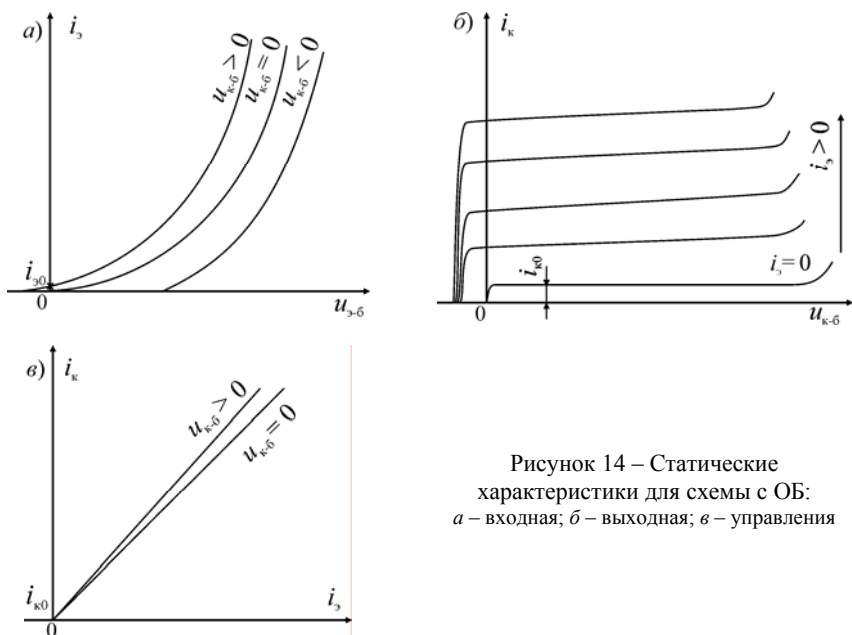


Рисунок 14 – Статические характеристики для схемы с ОБ:
 а – входная; б – выходная; в – управления

Ток коллектора при $i_s = 0$ называют *начальным* или *нулевым* $i_{к0}$. Величина его небольшая, порядка десятков микроампер, определяется концентрацией неосновных носителей тока в базе и коллекторе. Режим работы транзистора при токе коллектора, сравнимым с $i_{к0}$, является режимом отсечки.

При появлении тока эмиттера ($i_s > 0$) и его увеличении характеристика коллекторного тока смещается вверх по отношению к характеристике, снятой при $i_s = 0$. Увеличение тока коллектора объясняется диффузией носителей, проникающих от эмиттера через базу к коллектору. Величина коллекторного тока почти не зависит от напряжения $u_{к-б}$, так как перемещение носителей тока, проникающих в базу к коллектору, происходит за счет процессов диффузии. Влияние ускоряющего поля коллектора на движениях этих носителей почти не сказывается.

Особенность выходных характеристик в том, что при $u_{к-б} = 0$ и $i_s > 0$ ток коллектора довольно велик – почти такой же, как и при $u_{к-б} > 0$. Это объясняется тем, что благодаря сопротивлению базы на коллекторном переходе имеется некоторое напряжение, создаваемое током базы. У многих транзисторов выходные характеристики имеют вид прямых линий, начиная от $u_{к-б} = 0$. Зависимость между токами i_k и i_s почти линейна. Поэтому выходные характеристики при одинаковом изменении тока i_s располагаются почти на одном и том же расстоянии друг от друга. Чем

больше токи, тем быстрее, то есть при меньших значениях $u_{к-б}$, происходит переход к электрическому пробую.

При перемене знака напряжения $u_{к-б}$ (то есть при прямом включении коллекторного перехода) ток коллектора становится равным нулю, так как при этом начинается инжекция электронов из коллектора в базу (дырок базы в коллектор). Эта инжекция компенсирует переход из базы в коллектор электронов, инжектируемых эмиттером. Режим, соответствующий $u_{к-б} < 0$ (область характеристик, расположенная во втором квадранте), является режимом насыщения.

Характеристики управления для схемы с ОБ показывают почти линейную зависимость между токами $i_к$ и i_3 (рисунок 14, в), что соответствует уравнению (2). Для различных $u_{к-б}$ эти характеристики располагаются очень близко друг от друга, что подчеркивает малое влияние напряжения $u_{к-б}$ на ток коллектора. При токе $i_3 = 0$ характеристики должны показывать ток $i_{к0}$, но обычно этот ток настолько мал, что кривые изображают, идущими из начала координат.

Вид характеристик транзистора в схеме с общим эмиттером отличается от вида характеристик, снятых в схеме с общей базой. Входная характеристика (рисунок 15, а), как и в предыдущем случае, имеет вид ВАХ диода в прямом направлении. Под влиянием напряжения $u_{к-э} > 0$ эта характеристика смещается вниз и вправо. Это значит, что повышению потенциала коллектора соответствует уменьшение тока базы $i_б$ при том же значении напряжения $u_{б-э}$. Такое явление объясняется действием обратной связи в транзисторе. Часть напряжения $u_{к-э}$ оказывается приложенной к переходу база – эмиттер; во внешней цепи это напряжение действует навстречу напряжению источника, подключенного к этому переходу, и приводит к уменьшению тока базы.

Семейство выходных характеристик показано на рисунке 15, б. Как правило, характеристики даются при различных токах базы. Первая характеристика при $i_б = 0$ выходит из начала координат и напоминает обычную характеристику для обратного тока полупроводникового диода.

Если $i_б > 0$, то выходная характеристика расположена выше, чем при $i_б = 0$, и тем выше, чем больше ток $i_б$. Следовательно, пропорционально возрастает и ток $i_к$. Между токами базы и коллектора имеется зависимость $i_к = \beta i_б + i_{к-э0}$, где $i_{к-э0}$ представляет собой начальный сквозной ток, протекающий через транзистор (через все три области и два перехода) в том случае, если $i_б = 0$, то есть оборван провод базы.

Выходные характеристики показывают, что при увеличении $u_{к-э}$ от нуля до небольших значений (десятые доли вольта) ток коллектора резко возрастает, а при дальнейшем увеличении $u_{к-э}$ характеристики идут с небольшим подъемом, что означает сравнительно малое влияние выходного напряжения на ток коллектора. Эта часть характеристики соответствует активному режиму работы транзистора.

Выходные характеристики также показывают, что чем больше токи $i_к$, тем раньше, то есть при меньших значениях $u_{к-э}$, наступает электрический пробой.

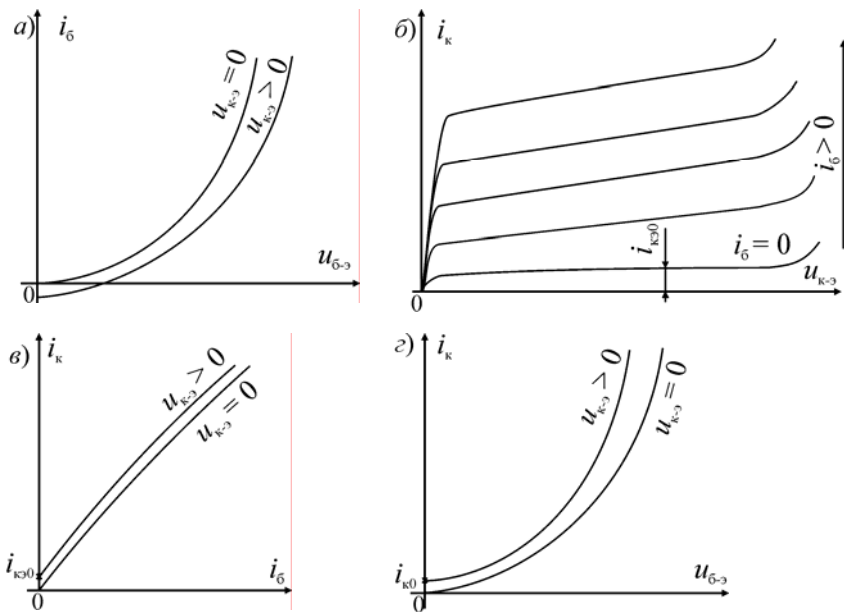


Рисунок 15 – Статические характеристики для схемы с ОЭ:
а – входная; *б* – выходная; *в*, *г* – управления

На рисунках 15, *в* и *г* приведены характеристики управления (прямой передачи). Эти характеристики наглядно показывают, что между токами i_k и i_b существует зависимость, близкая к линейной, а зависимость i_k от входного напряжения $u_{б-э}$ нелинейна. Изменение напряжения $u_{к-э}$ мало влияет на i_k , и характеристики для различных $u_{к-э}$ расположены очень близко друг к другу. В справочниках приводится лишь одна кривая для некоторого среднего значения $u_{к-э}$. При $i_b = 0$ протекает небольшой сквозной ток коллектора $i_{к-э0}$, при $u_{б-э} = 0$ протекает небольшой начальный ток коллектора $i_{к0}$.

Статические характеристики транзистора, включенного по схеме с ОК (рисунок 13, *з*), практически не отличаются от характеристик транзистора, включенного по схеме с ОЭ, и в справочниках не приводятся.

Основным семейством характеристик транзистора является семейство, снятое для схемы с общим эмиттером.

Основными параметрами, характеризующими транзистор как активный нелинейный четырехполюсник (при любой схеме включения), являются коэффициенты усиления:

- по току $k_i = \Delta i_{\text{вых}} / \Delta i_{\text{вх}}$;
- напряжению $k_u = \Delta u_{\text{вых}} / \Delta u_{\text{вх}}$;

– мощности $k_p = k_i k_u = \Delta P_{\text{ВЫХ}} / \Delta P_{\text{ВХ}}$,

а также:

– входное сопротивление $R_{\text{ВХ}} = u_{\text{ВХ}} / i_{\text{ВХ}}$;

– выходное сопротивление $R_{\text{ВЫХ}} = u_{\text{ВЫХ}} / i_{\text{ВЫХ}}$.

Ниже приводится расчет указанных параметров транзистора для каждой схемы включения.

В схеме с ОБ

$$k_i^{\text{ОБ}} = \Delta i_{\text{К}} / \Delta i_{\text{Э}} = \alpha \approx 1; \quad (11)$$

$$R_{\text{ВХ}}^{\text{ОБ}} = \frac{u_{\text{Э-Б}}}{i_{\text{Э}}}, \quad (12)$$

где $R_{\text{ВХ}}^{\text{ОБ}}$ – сопротивление открытого эмиттерного перехода;

$$k_u^{\text{ОБ}} = \frac{\Delta u_{\text{К-Б}}}{\Delta u_{\text{Э-Б}}} = \frac{\Delta i_{\text{К}} R_{\text{Н}}}{\Delta i_{\text{Э}} R_{\text{ВХ}}^{\text{ОБ}}} = \alpha \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{ВХ}}^{\text{ОБ}}}. \quad (13)$$

Таким образом, схема с ОБ характеризуется малым входным сопротивлением, отсутствием усиления по току, большим усилением по напряжению и мощности.

В схеме с ОЭ

$$k_i^{\text{ОЭ}} = \Delta i_{\text{К}} / \Delta i_{\text{Б}} = \beta \gg 1; \quad (14)$$

$$R_{\text{ВХ}}^{\text{ОЭ}} = \frac{u_{\text{Б-Э}}}{i_{\text{Б}}} = \frac{u_{\text{Б-Э}} i_{\text{Э}}}{i_{\text{Э}} i_{\text{Б}}} = R_{\text{ВХ}}^{\text{ОБ}} \frac{i_{\text{К}} + i_{\text{Б}}}{i_{\text{Б}}} = R_{\text{ВХ}}^{\text{ОБ}} (\beta + 1); \quad (15)$$

$$k_u^{\text{ОЭ}} = \frac{\Delta u_{\text{К-Э}}}{\Delta u_{\text{Б-Э}}} = \frac{\Delta i_{\text{К}} R_{\text{Н}}}{\Delta i_{\text{Б}} R_{\text{ВХ}}^{\text{ОЭ}}} = \frac{\beta}{\beta + 1} \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{ВХ}}^{\text{ОБ}}} \approx \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{ВХ}}^{\text{ОБ}}} \gg 1 \quad (16)$$

Таким образом, схема с ОЭ имеет большее, чем схема с ОБ, входное сопротивление и усиливает сигнал как по току, так по напряжению и мощности.

Достоинство схемы с ОЭ – удобство питания от одного источника, поскольку на коллектор и базу подаются питающие напряжения одного знака.

Недостатки данной схемы – худшие по сравнению со схемой ОБ частотные и температурные свойства. С повышением частоты усиления в схеме ОЭ снижаются в значительно большей степени, нежели в схеме с ОБ. Режим работы схемы с ОЭ сильно зависит от температуры.

В схеме с ОК

$$k_i^{\text{ОК}} = \Delta i_{\text{Э}} / \Delta i_{\text{Б}} = (\Delta i_{\text{К}} + \Delta i_{\text{Б}}) / \Delta i_{\text{Б}} = \beta + 1 \approx \beta \gg 1; \quad (17)$$

$$\begin{aligned} R_{\text{ВХ}}^{\text{ОК}} &= \frac{u_{\text{К-Б}}}{i_{\text{Б}}} = \frac{u_{\text{Э-Б}} + u_{\text{К-Э}}}{i_{\text{Б}}} = \frac{u_{\text{Э-Б}} i_{\text{Э}}}{i_{\text{Э}} i_{\text{Б}}} + \frac{u_{\text{К-Э}}}{i_{\text{Б}}} = \\ &= R_{\text{ВХ}}^{\text{ОБ}} (\beta + 1) + R_{\text{Н}} (\beta + 1) = (R_{\text{Н}} + R_{\text{ВХ}}^{\text{ОБ}}) (\beta + 1); \end{aligned} \quad (18)$$

$$k_u^k = \frac{\Delta u_{к-3}}{\Delta u_{к-6}} = \frac{\Delta u_{к-3}}{\Delta u_{3-6} + \Delta u_{к-3}} = \frac{\Delta i_3 R_H}{\Delta i_3 R_{вх}^6 + \Delta i_3 R_H} = \frac{R_H}{R_{вх}^6 + R_H} \approx 1. \quad (19)$$

Таким образом, схема с ОК имеет значительно большее значение входного сопротивления, чем любая другая схема включения транзистора, и усиливает сигнал по току и мощности. Большое значение входного сопротивления предопределяет широкое применение на практике данной схемы в качестве согласующего устройства.

Коэффициент усиления по напряжению близок к единице, причем всегда меньше ее, то есть схема с ОК практически не изменяет значения напряжения входного сигнала, иначе говоря, выходное напряжение повторяет входное. Именно поэтому эта схема называется *эмиттерный повторитель*. Эмиттерным потому, что сопротивление нагрузки включено в провод эмиттера и выходное напряжение снимается с эмиттера относительно общего провода схемы.

Для удобства сравнения основные свойства всех трех схем включения транзисторов сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Основные параметры схем включения

Параметр	Схема ОЭ	Схема ОБ	Схема ОК
k_i	Десятки – сотни	Немного меньше единицы	Десятки – сотни
k_u	Десятки – сотни	Десятки – сотни	Немного меньше единицы
k_p	Сотни – десятки тысяч	Десятки – сотни	Десятки – сотни
$R_{вх}$	Сотни ом – единицы килоом	Единицы – десятки килоом	Десятки – сотни килоом
$R_{вых}$	Единицы – десятки килоом	Сотни килоом – единицы мегаом	Сотни ом – единицы килоом
Фазовый сдвиг между $u_{вых}$ и $u_{вх}$	180°	0	0

2.7 Эквивалентные схемы

Эквивалентные схемы применяются для анализа цепей, содержащих транзисторы.

Исходя из того, что биполярный транзистор есть совокупность двух встречно включенных взаимодействующих *p-n*-переходов, его можно представить в виде эквивалентной схемы на постоянном токе, показанной на рисунке 16, и представляющую собой физическую модель транзистора.

Эквивалентная схема биполярного транзистора на постоянном токе, являющаяся нелинейной физической моделью биполярного транзистора, называется моделью Эберса–Молла. Представленная модель характеризует только активную область транзистора, не учитывая его пассивную (паразитную)

область. Отображение пассивной области базы и коллектора за счет введения в эквивалентную схему соответствующих резисторов сильно усложнило бы ее использование, а сама схема потеряла бы свою наглядность. Модель Эберса–Молла хорошо отражает обратимость транзистора – принципиальную равноправность обоих его переходов. Эта равноправность особенно ярко проявляется в режиме двойной инжекции, когда на обоих переходах действуют прямые напряжения. В таком режиме каждый переход одновременно инжектирует носители в базу и собирает носители, дошедшие от другого перехода. Токи инжектируемых носителей обозначены через i_1 (входной ток) и i_2 (выходной ток), а токи собираемых носителей – через $\alpha_{0N}i_1$ и $\alpha_{0I}i_2$, где α_{0N} и α_{0I} – статические коэффициенты передачи тока соответственно при нормальном и инверсном включениях транзистора. Собираемые токи в данной модели обозначаются с помощью источников (генераторов) тока.

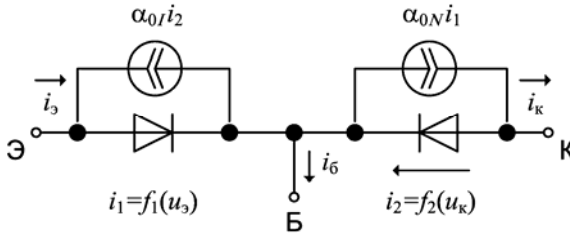


Рисунок 16 – Эквивалентная схема транзистора в виде модели Эберса–Молла

Как видно из рисунка 16,

$$\left. \begin{aligned} i_3 &= i_1 - \alpha_{0I} i_2, \\ i_k &= \alpha_{0N} i_1 - i_2. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Исходя из известной зависимости для электронно-дырочного перехода ($i = i_0 [e^{u/\varphi} - 1]$) можно записать выражения для токов инжектируемых носителей:

$$\left. \begin{aligned} i_3 &= i'_{3-60} \left(e^{u_3/\varphi_T} - 1 \right), \\ i_k &= i'_{k-60} \left(e^{u_k/\varphi_T} - 1 \right). \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Подставив (21) в (22), получим

$$\left. \begin{aligned} i_3 &= i'_{3-60} \left(e^{u_3/\varphi_T} - 1 \right) - \alpha_{0I} i'_{k-60} \left(e^{u_k/\varphi_T} - 1 \right), \\ i_k &= \alpha_{0N} i'_{3-60} \left(e^{u_3/\varphi_T} - 1 \right) - i'_{k-60} \left(e^{u_k/\varphi_T} - 1 \right). \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Разность токов i_3 и i_k составляет ток базы

$$i_6 = (1 - \alpha_{0N}) i'_{3-60} \left(e^{u_3/\varphi_T} - 1 \right) + (1 - \alpha_{0I}) i'_{k-60} \left(e^{u_k/\varphi_T} - 1 \right). \quad (23)$$

Выражения (22) и (23) называются формулами Эберса–Молла. Они являются математической моделью транзистора и составляют основу для анализа его работы. Следует отметить, что в этих формулах положительными считаются прямые напряжения на эмиттерном и коллекторном переходах. Кроме того, необходимо иметь в виду, что параметры $i_{к60}$ и $i_{э60}$ в этих формулах – это тепловые, а не обратные токи переходов, которые в случае кремния намного превышают тепловые. Только тогда, когда на оба перехода заданы обратные напряжения, формулы (22) и (23) теряют силу и обратные токи следует оценивать с учетом тока термогенерации.

Рассмотренная выше физическая модель биполярного транзистора – модель Эберса–Молла – по своей сути нелинейна и обычно применяется для анализа работы транзистора только при больших изменениях напряжения и тока.

Большому классу электронных схем свойственен такой режим работы транзистора, при котором на фоне сравнительно больших постоянных токов и напряжений действуют малые переменные составляющие. В этом случае постоянные и переменные составляющие сигнала могут анализироваться отдельно и анализ постоянных составляющих осуществляется с помощью физической модели Эберса–Молла, а при анализе переменных составляющих используется *малосигнальная эквивалентная схема*, состоящая из линейных элементов. Параметры ее элементов получают линеаризацией *исходных характеристик* транзисторов в окрестности режима работы по постоянному току. Из малосигнальных эквивалентных схем биполярного транзистора наиболее часто встречается Т-образная. Такая схема для включения транзистора с ОБ может быть легко получена из рисунка 14 заменой эмиттерного и коллекторного диодов их дифференциальными сопротивлениями $r_э$ и $r_к$, а статических коэффициентов передачи тока α_{0N} и α_{0I} – дифференциальными коэффициентами при нормальном α_N и инверсном α_{0I} включениях перехода. Если транзистор работает в нормальном режиме, то из эквивалентной схемы можно исключить источник тока $\alpha_{0I}i_2$ и обозначить α_N через α . Кроме того, на высоких частотах необходимо учитывать паразитные емкости переходов, подключаемых параллельно дифференциальным сопротивлениям эмиттера и коллектора.

2.8 Особенности применения транзисторов

Высокая надежность радиоэлектронной аппаратуры может быть обеспечена только при учете таких факторов, как разброс параметров транзисторов, их температурная нестабильность и зависимость параметров от режима работы, а также изменение параметров транзисторов в процессе эксплуатации.

В аппаратуре транзистор может быть использован в широком диапазоне напряжений и токов. Ограничением служат значения предельно допустимых режимов, превышение которых в условиях эксплуатации не допускается независимо от длительности импульсов напряжения или тока. Поэтому при

применении транзисторов необходимо обеспечить их защиту от мгновенных изменений токов и напряжений, возникающих при переходных процессах, а также при изменении питающих напряжений.

Для повышения надежности транзисторов при эксплуатации рекомендуется использовать их в режимах, по напряжению, току и рассеиваемой мощности на 15–20 % меньших предельно допустимых значений. Однако следует иметь в виду, что применение транзисторов при малых рабочих токах приводит к снижению устойчивости их работы в диапазоне температур и нестабильности усиления во времени. Использование более высокочастотных типов транзисторов в низкочастотных цепях нежелательно, так как они дороги, склонны к самовозбуждению и обладают меньшими эксплуатационными запасами.

Диапазон рабочих температур транзисторов ограничен. Верхний предел связан с ростом концентрации неосновных носителей в полупроводнике, увеличением вероятности теплового пробоя и для германиевых транзисторов составляет от 70 до 100 °С, а для кремниевых от 125 до 200 °С. Минимальная рабочая температура составляет от минус 60 до минус 70 °С.

При применении мощных транзисторов необходимо обеспечить правильный тепловой режим работы, чтобы температура корпуса транзистора была минимальной и не превышала допустимую.

Для эффективного теплоотвода в мощных транзисторах могут использоваться специально сконструированные радиаторы или конструктивные элементы узлов и блоков. Место теплового контакта транзистора с теплоотводящим элементом шлифуется, а сам теплоотвод рекомендуется покрывать черной краской. При необходимости электрической изоляции корпуса (коллектора) транзистора лучше изолировать теплоотводящий элемент от корпуса аппаратуры, чем транзистор от теплоотвода (радиатора).

Методика качественной проверки биполярных транзисторов и определения их типа предполагает следующие действия.

1 Необходимо найти выводы транзистора от базы, коллектора и эмиттера. С помощью омметра, путем его последовательного подключения, первым находят вывод базы. Он является общим для коллекторного и эмиттерного переходов.

2 Затем измеряют прямые сопротивления коллекторного и эмиттерного переходов. Учитывая, что технологически прямое сопротивление коллекторного перехода делается больше, чем эмиттерного, определяют коллекторный и эмиттерный выводы.

Транзистор исправен, если коллекторный и эмиттерный переходы работают как диоды.

Тип транзистора также можно определить с помощью омметра. Если на базу транзистора подать «плюс» омметра и при этом сопротивления обоих переходов будут минимальными, следовательно, это транзистор *n-p-n*-типа. Если на базу подключен «минус» омметра и выполняется то же условие, то это будет транзистор *p-n-p*-типа.

3 СОСТАВНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Анализируя выражения для коэффициентов усиления каскадов, выполненных на биполярных транзисторах, можно заключить, что в конечном счете максимальное значение их коэффициента усиления определяется коэффициентом передачи тока транзистора в схеме с общим эмиттером $h_{21\beta}$ (β). Реальное значение β определяется типом и технологией изготовления транзистора и обычно не превышает нескольких сотен. Увеличение β выше этого значения в ряде случаев позволяет существенно упростить схемотехнику проектируемых усилительных устройств. Так, при построении многокаскадных усилителей можно обойтись меньшим числом каскадов или при управлении мощной нагрузкой отказаться от промежуточных усилителей мощности и управлять значительной мощностью непосредственно от маломощного источника.

Решить проблему увеличения β можно чисто схемотехническим путем за счет каскадного включения нескольких транзисторов. Применительно к транзисторам одного типа проводимости такие схемы были впервые предложены Дарлингтоном, и поэтому часто называются *схемами Дарлингтона* или *составными транзисторами*.

На рисунке 17 представлен составной транзистор, выполненный на двух $n-p-n$ -транзисторах по схеме с ОЭ. Для каждого из транзисторов можно записать следующие выражения:

$$i_{k1} = i_{\beta 1} \beta_1 + i_{k-6 01},$$

$$i_{k2} = i_{\beta 2} \beta_2 + i_{k-6 02}.$$

Для составного транзистора выполняется условие $i_{\beta 2} = i_{\beta 1}$. Тогда, используя выражение, выразим ток коллектора транзистора $V T_2$ через базовый ток транзистора $V T_1$, при этом для простоты будем полагать, что для обоих транзисторов $i_{k0} = 0$,

$$i_{k2} = i_{\beta 2} \beta_2 = i_{\beta 1} \beta_2 = (i_{k1} + i_{\beta 1}) \beta_2 = (i_{\beta 1} \beta_1 + i_{\beta 1}) \beta_2 = i_{\beta 1} (\beta_1 + 1) \beta_2.$$

Суммарный выходной ток составного транзистора

$$i_{\text{вых } \Sigma} = i_{k1} + i_{k2} = i_{\beta 1} \beta_1 + i_{\beta 1} (\beta_1 + 1) \beta_2 = i_{\beta 1} (\beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2).$$

Полагая, что $\beta_1 + \beta_2 \ll \beta_1 \beta_2$, окончательно запишем

$$i_{\text{вых } \Sigma} \approx \beta_1 \beta_2. \quad (24)$$

Таким образом, в составном транзисторе суммарный коэффициент передачи тока равен произведению коэффициентов передачи отдельных транзисторов. Применение составного транзистора обеспечивает значительное усиление по току. Практически коэффициент передачи тока β может достигать нескольких тысяч.

Работоспособность приведенной схемы не нарушается, если выполняется условие $i_{\beta 1} > i_{k02}$. В противном случае из-за разрыва цепи протекания тока

пропорциональность между входным и выходным токами нарушается. Следовательно, при малых выходных токах схема составного транзистора, приведенная на рисунке 17, может оказаться неработоспособной. Для устранения этого недостатка эмиттерный переход транзистора $VT2$ обычно шунтируют резистором смещения $R_{см}$. Максимально допустимое сопротивление этого резистора определяется из условия, что создаваемое на нем от протекания тока $i_{к02}$ падение напряжения недостаточно для отпирания транзистора и обычно приводится в справочных данных на транзистор.

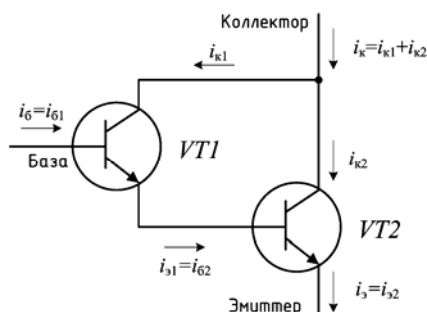


Рисунок 17 – Составной транзистор

Рассмотренная схема является не единственно возможной. Составные транзисторы строятся и на приборах различного типа проводимости. Такие структуры называют *составными транзисторами с дополнительной симметрией*. В принципе структура составного транзистора может быть построена с использованием как полевых, так и биполярных транзисторов.

Составной транзистор применяется в схемах, работающих с большими токами, где требуется управлять мощной нагрузкой при помощи небольших управляющих сигналов. Высокий коэффициент усиления по току пары Дарлингтона обеспечивает высокое входное сопротивление усилителей на их основе. В силовой электронике для переключения больших токов используются соединения из трех или даже четырех составных транзисторов.

4 УСИЛЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

В большинстве электронных устройств необходимо обеспечить усиление электрических сигналов. Это объясняется, как правило, несоответствием параметров электрических сигналов, получаемых при первичном преобразовании различных неэлектрических физических величин в электрические, параметрам, необходимым для нормальной работы большинства исполнительных устройств. Для этих целей используют устройства, называемые усилителями.

Усилитель – это устройство, предназначенное для усиления (увеличения) входного электрического сигнала по напряжению, току или мощности с сохранением их формы и частоты за счет преобразования энергии источника питания в энергию выходного сигнала.

Выходной сигнал должен либо соответствовать входному, либо отличаться от него в определенных заданных пределах. Поскольку мощность

сигнала на выходе усилителя больше, чем на входе, то по закону сохранения энергии *усилительное устройство* должно включать в себя источник энергии; тогда обобщенную структурную схему усилительного устройства можно представить как показано на рисунке 18.

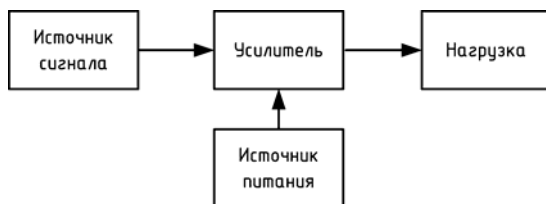


Рисунок 18 – Обобщенная структурная схема усилителя

Суть процесса усиления электрических сигналов состоит в преобразовании энергии источника питания усилителя в энергию выходного сигнала по закону, определяемому входным управляющим сигналом. Этот процесс осуществляется при помощи *усилительного элемента*.

Усилительный элемент (УЭ) – основной элемент усилителя. Для связи его с нагрузкой и источником сигнала в усилителе предусматриваются специальные цепи связи. Рабочий режим УЭ обеспечивается дополнительным источником питания. Поскольку иметь в одном усилителе несколько источников питания невыгодно, стремятся использовать один, а вспомогательные напряжения, необходимые для обеспечения режима работы УЭ, получать с помощью делителей напряжения. Усилительный элемент вместе с остальными элементами, обеспечивающими режим работы усилителя и его связь с источником сигнала и нагрузкой, образуют усилительный каскад.

Усилительный каскад представляет собой минимальную часть усилителя, сохраняющую его функции. В простейшем случае усилитель имеет один каскад, вариант структурной схемы которого показан на рисунке 19.

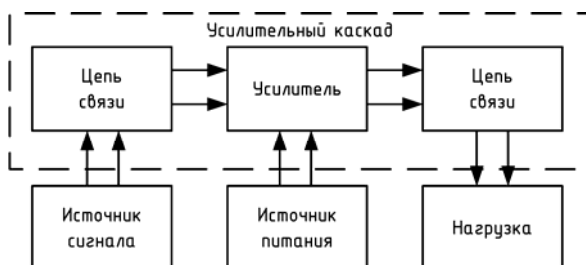


Рисунок 19 – Структурная схема однокаскадного усилителя

При построении усилительных устройств наибольшее распространение получили каскады на биполярных транзисторах, использующие схемы включения транзистора с общим эмиттером и общим коллектором. Схемы включения с общей базой находят применение только в узком классе устройств.

Процесс усиления в схемах на биполярных транзисторах состоит в преобразовании энергии постоянного тока в энергию переменного тока. При этом транзистор является своеобразным регулятором. Под действием напряжения (или тока) входного сигнала он управляет током источника питания. При этом величина и форма управляемого тока зависит не только от амплитуды и формы входного сигнала, но и от выбранного режима работы транзистора, то есть от положения рабочей точки на характеристиках транзистора.

4.1 Принцип работы электронного усилителя

Простейшая схема каскада на биполярном транзисторе (рисунок 20, а) содержит транзистор VT и нагрузочный резистор R_k , включенный в цепь коллектора последовательно с источником питания E_{π} . Во входной цепи последовательно с источником переменного усиливаемого напряжения $u_{вх}$ включен источник постоянного напряжения смещения $U_{см}$. Источники постоянного напряжения зашунтированы разделительными конденсаторами (на схеме не показаны). Переменная составляющая тока коллектора, протекая через резистор R_k , выполняющий функции коллекторной нагрузки, создает на нем выходное напряжение.

Рассмотрим работу каскада. В исходном состоянии или режиме покоя $u_{вх} = 0$. При этом напряжение на базе равно $U_{см}$, а ток коллектора и напряжение на нем в исходной рабочей точке равны $I_{к0}$ и $U_{к0} = E_{\pi} - I_{к0}R_k$.

При подаче входного переменного напряжения $u_{вх} = U_{m вх} \sin \omega t$ (рисунок 20, б). Оно дополнительно открывает транзистор в первый полупериод и частично закрывает его во второй. В результате ток коллектора изменится около значения в исходной рабочей точке по закону: $i_k = I_{к0} + I_{m к} \sin \omega t$.

Мгновенное значение напряжения коллектор – эмиттер

$$u_k = E_{\pi} - R_k i_k = U_{к0} - U_{m к} \sin \omega t,$$

где $U_{m к} = I_{m к} R_k$ – амплитуда его переменной составляющей. В первый полупериод u_k уменьшается из-за увеличения тока i_k и падения напряжения на R_k . Здесь R_k играет роль преобразования тока в напряжение.

При достаточно большом R_k оказывается $U_{m к} > U_{m вх}$, то есть каскад дает усиление по напряжению. Благодаря большому внутреннему сопротивлению выходной цепи транзистора включение сопротивления R_k почти не уменьшает амплитуду переменного тока коллектора, то есть транзистор выступает в роли управляемого генератора сигнального тока, а сопротивления R_k – в роли преобразователя этого тока в сигнальное напряжение u_k .

Процесс управления током i_k выходной цепи транзистора можно рассматривать также, как результат изменения его мгновенного внутреннего сопротивления постоянному току (рисунок 20, в). Благодаря этому происходит непрерывное перераспределение напряжения источника питания между транзистором и нагрузкой. Управление внутренним сопротивлением транзистора осуществляется входным напряжением.

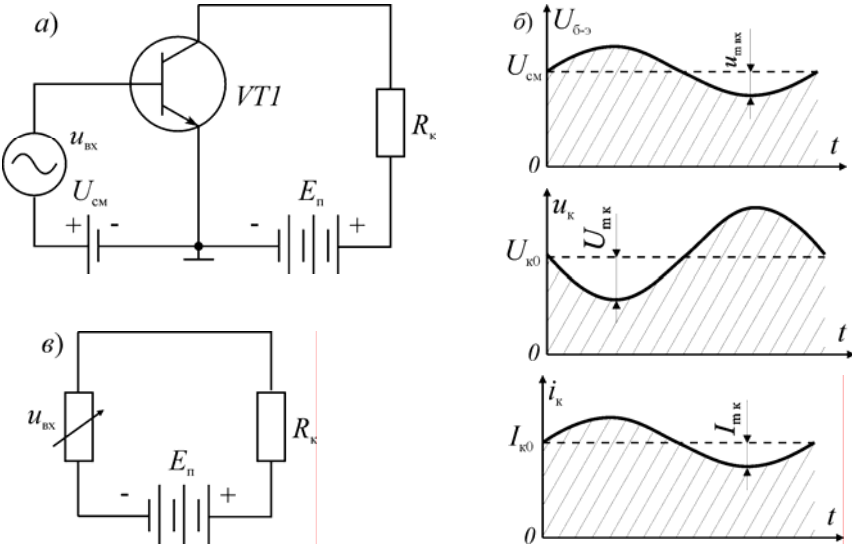


Рисунок 20 – Принцип работы электронного усилителя

4.2 Схемы питания и стабилизации режима

В каскадах с транзисторами применяют обычно питание от одного источника – источника выходной цепи (E_k). Для нормального режима работы транзистора необходимо, чтобы между эмиттером и базой было постоянное напряжение, называемое *напряжением смещения базы* (0,5–0,7 В).

Ток эмиттера, проходя через переход эмиттер – база, создает на нем некоторое падение напряжения, но оно недостаточно, и режим работы транзистора без дополнительного смещения оказывается непригодным для усиления (токи слишком малы). Необходимо подать некоторое смещение от источника питания коллекторной цепи. Это делается с помощью резистора или делителя. На рисунке 21 показаны типичные схемы подачи смещения на базу.

В каскаде ОЭ (рисунок 21, а) постоянный ток базы $I_{б0}$ проходит через резистор R , на котором гасится почти все напряжение E_k . Небольшая часть напряжения падает на переходе база – эмиттер и является смещением базы.

Сопротивление резистора $R = E_k / I_{60}$. При этом сопротивление нагрузки выбирается таким, чтобы потенциал на коллекторе равнялся половине напряжения E_k , то есть $R_n = (E_k / 2) / I_{k0}$. В данных формулах I_{60} и I_{k0} представляют собой базовый и коллекторный токи в режиме покоя (то есть в отсутствии входного переменного сигнала).

Недостаток этой схемы состоит в том, что выходное напряжение (а точнее ток коллектора) в режиме покоя целиком зависит от величины β транзистора, имеющей достаточно большой разброс значений у транзисторов одного типа.

На рисунке 21, б показана подача смещения с помощью делителя напряжения $R1, R2$. В этой схеме основная часть напряжения E_k падает на резисторе $R1$, а небольшая часть ($U_{6-э0}$), являющаяся напряжением смещения базы, падает на резисторе $R2$, который подключен параллельно входу транзистора. Сопротивления делителя можно определить по формулам:

$$R1 = E_k / (I_d + I_{60}),$$

$$R2 = U_{6-э0} / I_d,$$

где I_d – ток самого делителя.

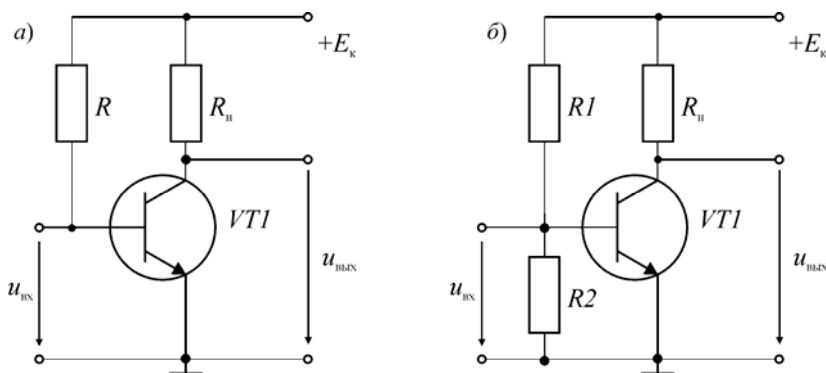


Рисунок 21 – Схемы подачи напряжения смещения на базу

Способ подачи напряжения смещения с помощью делителя применяется довольно часто, но он неэкономичен, так как источник должен создавать дополнительный ток I_d , нагревающий резисторы делителя. Кроме того, в рассматриваемой схеме резистор $R2$, будучи подключенным параллельно входу транзистора, весьма заметно уменьшает входное сопротивление каскада.

Существенный недостаток транзистора – значительное изменение их характеристик и параметров при изменениях температуры окружающей среды, обратного тока коллекторного перехода I_{k0} , напряжения эмиттерного перехода $U_{6-э}$ транзистора, коэффициента передачи тока $h_{21э}$ (β), напряжения питания, сопротивления нагрузки и т. п. Эти изменения принято характеризовать понятием *дрейф нуля усилителя*.

Дрейфом нуля называется изменение выходного напряжения или тока усилителя, не связанное с воздействием входного сигнала, а обусловленное изменением режимов работы его элементов вследствие воздействия различных внешних дестабилизирующих факторов.

Существует три основных метода стабилизации режима работы транзисторного каскада:

- термокомпенсация;
- параметрическая стабилизация;
- введение цепей отрицательной обратной связи (ООС).

Все методы стабилизации сводятся к поддержанию постоянным коллекторного тока.

Метод термокомпенсации базируется на том, что внешними конструктивными и схемотехническими решениями стараются исключить воздействие на транзисторный каскад нежелательных возмущений. Такими решениями может быть выделение такого каскада в некоторый самостоятельный узел, в котором поддерживается постоянная температура, подведено стабилизированное напряжение питания.

Метод параметрической стабилизации базируется на использовании в транзисторных каскадах нелинейных элементов (терморезисторов, диодов, транзисторов), включаемых в цепи делителей напряжения. При этом изменения параметров усилительного элемента компенсируются изменением параметров нелинейных элементов. Другое название этого метода – *метод нелинейной стабилизации*.

Общим для обоих рассмотренных методов является компенсация только одного из дестабилизирующих факторов. Поэтому при построении усилительных каскадов на транзисторах прибегают к методу введения цепей отрицательной обратной связи.

Метод введения цепей ООС предполагает введение в схему усилительного каскада цепей, осуществляющих передачу сигнала с выхода схемы на вход и, тем самым, обеспечивающих коррекцию параметров и характеристик.

В усилительных каскадах на биполярных транзисторах получили распространение схемы коллекторной и эмиттерной стабилизаций, иначе называемых *стабилизацией с параллельной ООС по напряжению и последовательной ООС по току* соответственно.

В *схеме коллекторной стабилизации* (рисунок 22, а) резистор R , служащий для установки необходимого смещения на базе, подключен не к источнику E_k , как в схеме на рисунке 21, а, а к коллектору. Механизм обратной связи работает следующим образом. Если от нагрева или смены транзистора ток i_k возрастает, то увеличится падение напряжения на R , а напряжение $U_{к-э}$ соответственно уменьшится. При этом происходит уменьшение напряжения $U_{б-э}$, что приведет к уменьшению тока i_k . Таким образом, одновременно происходят противоположные изменения этого тока, и в результате он остается почти постоянным.

Рассмотренная схема наиболее проста и экономична, но дает хорошую стабилизацию лишь в том случае, если на резисторе нагрузки падает не менее половины напряжения источника E_2 . Кроме того, введение параллельной ООС по напряжению снижает коэффициент усиления каскада, уменьшает его входное и выходное сопротивления, расширяет полосу усиливаемых частот, снижает линейные и нелинейные искажения.

Более сложна и менее экономична *схема эмиттерной стабилизации* (рисунки 22, б). Она требует источника E_2 с несколько более высоким напряжением, но по стабилизирующим свойствам значительно превосходит предыдущую схему. Здесь резисторы $R1$ и $R2$ образуют делитель для получения смещения на базе, а резистор R_3 в проводе эмиттера является стабилизирующим. Падение напряжения на этом резисторе $U_3 = I_{30}R_3$ действует навстречу напряжению $U_2 = I_{д}R2$. Поэтому напряжение смещения базы составляет $U_{б-30} = U_2 - U_3$. Резистор R_3 создает последовательную ООС по постоянному току. Механизм действия этой связи состоит в следующем. Если под влиянием температуры токи в транзисторе начнут возрастать, то от повышения тока I_{30} увеличится напряжение U_3 и соответственно уменьшится напряжение смещения на базе $U_{б-30}$, то есть эмиттерный переход будет «прикрываться», а это вызовет уменьшение токов. В результате такого изменения одновременно в противоположные стороны токи почти постоянны и режим работы каскада получается более стабильным.

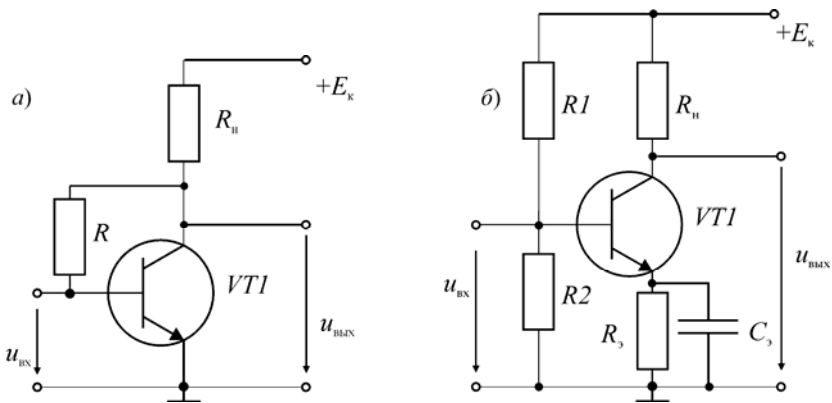


Рисунок 22 – Схемы стабилизации режима усилительного каскада на биполярном транзисторе: коллекторная (а) и эмиттерная (б) стабилизации

Для того чтобы резистор $R2$ не создавал ООС по переменному («полезному») току, он зашунтирован конденсатором C_3 достаточно большой емкости.

Эмиттерная стабилизация работает хорошо, независимо от сопротивления нагрузки $R_н$, причем тем лучше, чем больше ток делителя $I_{д}$ и сопротивление резистора R_3 . Однако чрезмерное увеличение резистора R_3 приводит к необходимости

значительного повышения E_k , что невыгодно. Расчет сопротивлений резисторов для схемы эмиттерной стабилизации делают по следующим формулам:

$$\begin{aligned} R1 &\approx (E_k - U_3) / (I_{60} + I_d); \\ R2 &\approx U_3 / I_d; R_3 \approx U_3 / I_{30}. \end{aligned} \quad (25)$$

При этом значение U_3 выбирается с учетом возможного повышения E_2 , а ток делителя обычно составляет от 3 до 5 базового тока (I_{60}).

Схемы коллекторной и эмиттерной стабилизации можно применять вместе и тогда стабилизация будет еще лучшей. Кроме того, следует заметить, что во многих случаях стабилизация необязательна, так как не требуется высокая стабильность усиления.

4.3 Усилительный каскад с общим эмиттером

Полупроводниковая техника на отдельных компонентах содержит ряд вариантов выполнения усилительного каскада на транзисторе с ОЭ. Принцип действия усилительных каскадов ОЭ рассмотрим на примере наиболее распространенной схемы рисунок 23. На входе каскада действуют усиливаемые переменные ток $i_{вх}$ и напряжение $u_{вх}$, а на выходе – усиленные переменные ток i_n и напряжение $u_{вых}$. Питание схемы осуществляется от одного источника – источника питания коллекторной цепи E_k .

Для обеспечения нормального режима работы необходимо, чтобы между эмиттером и базой было постоянное напряжение, называемое *напряжением смещения базы* (0,5–0,7 В). Это напряжение подают на базы с помощью делителя $R1$ и $R2$. Основная часть напряжения E_k падает на резисторе $R1$, а небольшая часть, являющаяся напряжением смещения $u_{б30}$, падает на резисторе $R2$, который подключен ко входу транзистора.

В этой схеме усилительного каскада конденсаторы $C1$ и $C2$ – разделительные. Конденсатор $C1$ служит для передачи на вход транзистора усиливаемого переменного напряжения. Чтобы потеря этого напряжения на конденсаторе $C1$ была незначительной, его емкостное сопротивление для самой низкой частоты должно быть достаточно малым. Емкость конденсатора – единицы и десятки микрофарад. Поэтому в качестве конденсатора $C1$ в низкочастотных схемах применяются малогабаритные электролитические конденсаторы. Также конденсатор $C1$ препятствует протеканию постоянного тока от источника питания E_k в цепь источника входного сигнала и исключает попадание на вход транзистора постоянного напряжения, если оно имеется в источнике колебаний (во входном усиливаемом сопротивлении). Кроме того, при отсутствии разделительного конденсатора $C1$ и малом сопротивлении источника колебаний эмиттерный переход оказывается замкнут коротко по постоянному напряжению и напряжение смещения равно нулю, то есть исключается нормальный режим работы (режим усиления) транзистора.

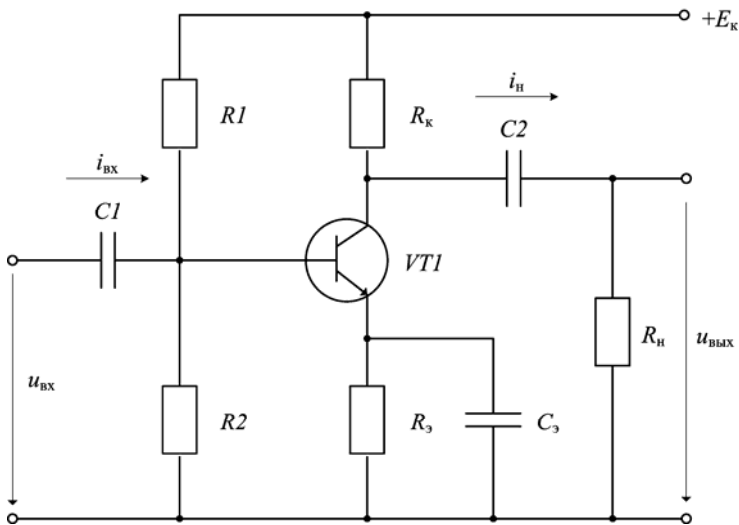


Рисунок 23 – Усилительный каскад с ОЭ

Конденсатор $C2$ обеспечивает выделение из коллекторного напряжения переменной составляющей, поступающей на резистор нагрузки R_n . Емкостное сопротивление этого конденсатора на низких частотах также должно быть небольшим.

Для обеспечения стабилизации данной схемы используется эмиттерная стабилизация, предполагающая включение последовательно с эмиттерным электродом резистора R_3 . Резистор R_3 и делитель $R1, R2$ составляют цепь *отрицательной обратной связи* (ООС) по постоянному току, предназначенную для термостабилизации (под *обратной связью* понимают процесс передачи части выходного сигнала на вход усилительного каскада).

Для того чтобы резистор R_3 не создавал отрицательной обратной связи по переменному току (то есть не уменьшал коэффициент усиления «полезного» переменного сигнала), он зашунтирован конденсатором C_3 достаточно большой емкости. Его сопротивление на низких частотах должно быть во много раз меньше R_3 . Поскольку сопротивление конденсатора мало, то переменный ток протекает по нему, а не через R_3 , и, следовательно, не создает падение напряжения на резисторе. В усилителях низкой частоты в качестве C_3 обычно выбирают электролитический конденсатор с емкостью от десятков до сотен микрофард.

Резистор R_k , включенный последовательно с коллекторным электродом, является нагрузочным для коллекторного перехода и ограничивает мощность, выделяемую в коллекторном переходе, и тем самым защищает переход от теплового пробоя.

4.4 Усилительный каскад с общим коллектором

Коллектор транзистора в схеме усилительного каскада ОК по переменному току заземлен (то есть соединен с корпусом) через источник питания E_k (рисунок 24). При этом входное напряжение подключено между базой и коллектором, а выходное – снимается непосредственно с эмиттера транзистора.

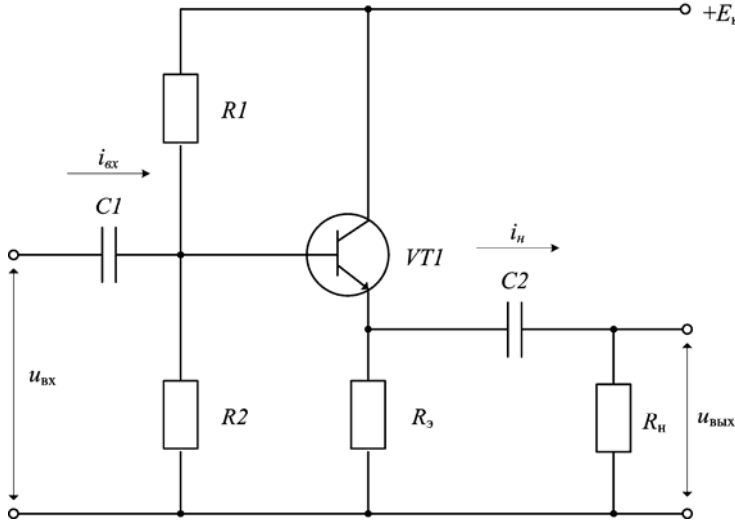


Рисунок 24 – Усилительный каскад с ОК

Делитель напряжения $R1, R2$ и разделительные конденсаторы $C1, C2$ выполняют те же функции, что и в каскаде ОЭ. Для работы усилительного каскада с ОК необходимо, чтобы напряжение смещения базы составляло от 0,5 до 0,7 В. В схеме R_3 является нагрузочным резистором.

Согласно принципу действия каскада ОК амплитуда выходного напряжения меньше амплитуды входного, поскольку они связаны соотношением: $u_{\text{ВЫХ}} = u_{\text{ВХ}} + u_{\text{б-э}}$.

Поэтому коэффициент усиления по напряжению

$$k_u = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{\text{ВХ}}} = \frac{u_{\text{ВХ}} - u_{\text{б-э}}}{u_{\text{ВХ}}} = 1 - \frac{u_{\text{б-э}}}{u_{\text{ВХ}}}$$

Как правило $u_{\text{б-э}} \ll u_{\text{ВХ}}$, следовательно, $k_u \approx 1$, а $u_{\text{ВЫХ}} \approx u_{\text{ВХ}}$.

Таким образом, выходной сигнал повторяет входной и по амплитуде и по фазе, поэтому усилительный каскад ОК называют *эмиттерным повторителем*.

Достоинством схемы с ОК является также ее большое входное и малое выходное сопротивления. Большое входное сопротивление позволяет подключать такой каскад к маломощным источникам сигналов и другим усили-

тельным каскадам, имеющим большое выходное сопротивление, не снижая их качественных показателей.

В то же время благодаря малому выходному сопротивлению усилителя с ОК к нему можно подключать другие устройства с малым входным сопротивлением. Благодаря этим особенностям усилитель с ОК широко применяется в качестве *согласующего каскада*. Он включается между каскадом с большим выходным сопротивлением и каскадом с малым входным сопротивлением и обеспечивает максимальную передачу напряжения.

5 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ

Электронные усилители, применяемые в автоматике, телемеханике и связи, должны удовлетворять определенным техническим требованиям. Достаточно полные сведения о характеристиках усилителей позволяют без электрических испытаний выяснить степень пригодности к работе конкретного усилителя, быстро и правильно выбрать или спроектировать его с учетом определенных условий эксплуатации, а также оценить предполагаемую технико-экономическую эффективность аппаратуры.

Важнейшими характеристиками усилителей являются:

- коэффициент усиления;
- входное и выходное сопротивления;
- выходная мощность;
- амплитудная и амплитудно-частотная характеристики;
- полоса пропускания (диапазон рабочих частот усилителя);
- степень искажения усиленного сигнала и др.

5.1 Коэффициент усиления

Основным количественным параметром усилителя является *коэффициент усиления* – отношение установившихся значений выходного и входного сигналов усилителей. В зависимости от типа усиливаемой величины различают коэффициенты усиления по напряжению K_U , току K_I или мощности K_P :

$$K_U = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}, \quad K_I = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}, \quad K_P = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}, \quad (26)$$

где $U_{\text{вх}}$, $I_{\text{вх}}$ – амплитудные значения переменных составляющих соответственно напряжения и тока на входе;

$U_{\text{вых}}$, $I_{\text{вых}}$ – амплитудные значения переменных составляющих соответственно напряжения и тока на выходе;

$P_{\text{вх}}$, $P_{\text{вых}}$ – мощности сигналов соответственно на входе и выходе.

Коэффициенты усиления часто выражают в логарифмических единицах – децибелах:

$$K_U(\text{дБ}) = 20\lg K_U, \quad K_I(\text{дБ}) = 20\lg K_I, \quad K_P(\text{дБ}) = 10\lg K_P. \quad (27)$$

5.2 Входное и выходное сопротивления

К количественным показателям усилителя относятся также входное $R_{вх}$ и выходное $R_{вых}$ сопротивления усилителя:

$$R_{вх} = U_{вх} / I_{вх}, R_{вых} = \Delta U_{вых} / \Delta I_{вых}, \quad (28)$$

где $U_{вх}$, $I_{вх}$ – амплитудные значения соответственно напряжения и тока на входе усилителя;

$\Delta U_{вых}$, $\Delta I_{вых}$ – приращения амплитудных значений напряжения и тока на выходе, вызванные изменением сопротивления нагрузки.

Значение входного и выходного сопротивлений должны учитываться при согласовании усилительного устройства как с источником входного сопротивления, так и с нагрузкой. Так для оптимальной мощности требуется, чтобы выходное сопротивление предыдущей схемы было бы равно входному сопротивлению последующей схемы ($R_{вх} = R_{вых}$). Для оптимальной передачи напряжения необходимо, чтобы выходное сопротивление предыдущей схемы было бы меньше входного сопротивления последующей схемы ($R_{вх} \gg R_{вых}$). Для передачи тока ситуация прямо противоположна передаче напряжения ($R_{вх} \ll R_{вых}$).

5.3 Амплитудная характеристика

Амплитудная характеристика (АХ) – зависимость амплитудного (или действующего) значения выходного напряжения от амплитудного (или действующего) значения входного напряжения при воздействии на вход усилителя гармонического колебания постоянной частоты (рисунок 25).

Идеальная АХ представляет собой прямую линию, выходящую из начала координат под некоторым углом α , который определяется коэффициентом усиления по напряжению.

Реальная АХ совпадает с идеальной лишь в области средних напряжений (участок Б-В). При больших значениях напряжения изгиб АХ обусловлен нелинейностью характеристик элементов усилителя и сопровождается появлением нелинейных искажений. Изгиб АХ при малых напряжениях (участок А-Б) связан с наличием в усилителе собственных помех, действующих на выходе при отсутствии сигнала. Помехи могут полностью забивать или сильно маскировать слабый сигнал. Для нормальной работы усилителя наименьшее выходное напряжение $U_{вых. min}$ должно в несколько раз превышать напряжение помех. Этому выходному напряжению соответствует минимально возможное входное напряжение $U_{вх. min}$. Лишь в пределах $U_{вх. min} \leq U_{вх} \leq U_{вх. max}$

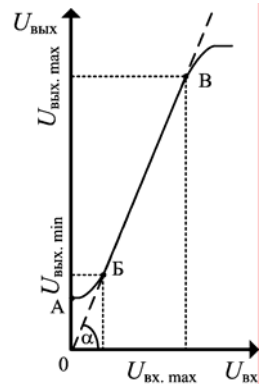


Рисунок 25 – Амплитудная характеристика усилителя

усилитель можно считать линейным. Величина $D = U_{\text{вх. max}}/U_{\text{вх. min}}$ ($D_{\text{дБ}} = 20\lg(U_{\text{вх. max}}/U_{\text{вх. min}})$) характеризует *динамический диапазон* усилителя.

Причинами собственных помех являются фон, наводки, тепловые шумы резисторов и элементов с активными потерями, шумы усилительного элемента.

5.4 Амплитудно-частотная характеристика

Амплитудно-частотная характеристика представляет собой зависимость модуля коэффициента усиления от частоты при воздействии на входе усилителя гармонического сигнала (рисунок 26). При построении АЧХ по вертикальной оси откладывают значение K_U в линейном масштабе, а по горизонтальной оси – частоту f (или круговую частоту $\omega = 2\pi f$). При экспериментальном снятии АЧХ измерения $U_{\text{вых}}(f)$ производят при неизменном входном напряжении на всех частотах $U_{\text{вх}}(f) = \text{const}$.

АЧХ может быть построена и в логарифмическом масштабе (рисунок 27). В этом случае она называется ЛАЧХ (то есть логарифмическая АЧХ), коэффициент усиления выражают в децибелах, а по оси абсцисс откладывают частоты через декаду (интервал частот, отличающихся на порядок, например 1 и 10 Гц и т. д.). Обычно в качестве точек отсчета выбирают частоты, соответствующие степеням десятки. Использование логарифмического масштаба обусловлено тем, что современные усилители усиливают сигнал в очень большом диапазоне частот.

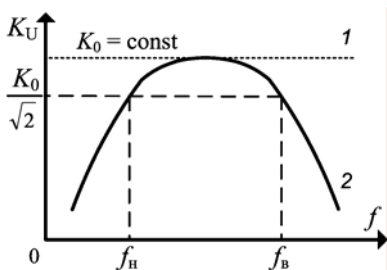


Рисунок 26 – АЧХ усилителя

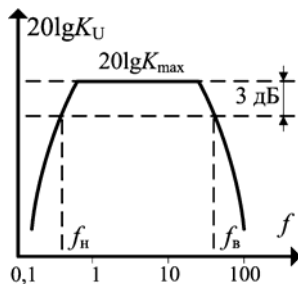


Рисунок 27 – ЛАЧХ усилителя

Идеальная АЧХ изображена на рисунке 26 (линия 1), параллельна горизонтальной оси, то есть $K_U(f) = \text{const}$. *Реальная АЧХ* (линия 2) показана на том же рисунке сплошной линией. Как видно из рисунка, в реальном усилителе в областях малых и высоких частот коэффициент усиления уменьшается, так как реактивные сопротивления схемы по-разному зависят от частоты.

Область АЧХ, в которой коэффициент усиления практически не зависит от частоты, называют *областью средних частот*. Нижней f_n или верхней f_v *граничной частотой* называют частоту, на которой коэффициент усиления уменьшается до заданного (допустимого) значения относительно коэффициента на средних частотах K_0 , то есть

$$K_0/\sqrt{2} \approx 0,707K_0. \quad (29)$$

Если коэффициент усиления измеряется в децибелах, то значениям граничных частот усиления соответствует уменьшение коэффициента усиления на 3 дБ (см. рисунок 27).

Область частот от f_n до f_v называют *диапазоном рабочих частот* или *полосой пропускания усилителя*. За среднюю частоту обычно принимают

$$f_{cp} = \sqrt{f_n f_v}. \quad (30)$$

Область АЧХ, где расположена f_n или f_v , называют соответственно *областью нижних* или *верхних частот*.

Для сравнения АЧХ усилителей с различными значениями максимального коэффициента усиления (коэффициента на средних частотах) K_0 или для оценки изменений АЧХ усилителя удобно пользоваться нормированной АЧХ. Ось ординат представляют в виде относительной величины

$$N(f) = K(f)/K_0. \quad (31)$$

Для оценки амплитудно-частотных искажений используют *коэффициент частотных искажений* M , численно равный отношению коэффициента усиления в области средних частот к коэффициенту усиления на заданной частоте:

$$M(f) = K_{max}/K(f) = 1/N(f). \quad (32)$$

На частотах, где $M = N = 1$, амплитудно-частотные искажения отсутствуют. Чем больше значение M или N отличается от единицы, тем больше искажения.

6 СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ТРАНЗИСТОРА 2Т312Б

В лабораторных работах используется лабораторный макет на основе биполярного транзистора 2Т312Б. Согласно справочным данным транзистор 2Т312Б является кремниевым планарным высокочастотным малой мощности транзистором *n-p-n*-типа. Предназначен для использования в радиовещательных приемниках, приемно-усилительной аппаратуре и другой аппаратуре широкого применения. Выпускается в металлическом герметичном корпусе со стеклянными изоляторами и гибкими выводами. Масса не более 1 г.

6.1 Статические характеристики

Семейство входных и выходных характеристик приведено на рисунках 28 и 29.

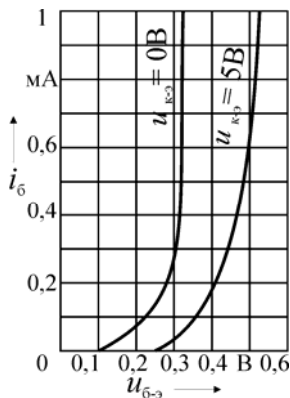


Рисунок 28 – Входные характеристики

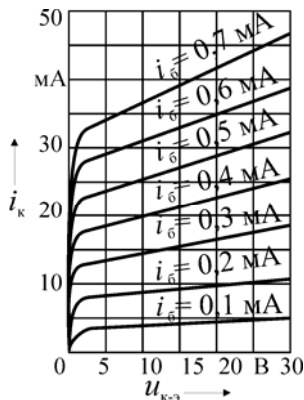


Рисунок 29 – Выходные характеристики

6.2 Электрические рабочие параметры

Коэффициент передачи тока базы $h_{21э} = 25 \dots 100$.

Постоянное напряжение коллектор – база $u_{к-б} = 2$ В.

Постоянный ток эмиттера $i_э = 20$ мА.

Напряжение насыщения коллектор – эмиттер $u_{кэН} = 0,5$ В.

Обратный ток коллектора $i_{к-60} = 1$ мкА.

Граничная частота коэффициента передачи тока $f_{гп} = 120$ МГц.

Емкость коллекторного перехода $C_к = 5$ пФ.

Емкость эмиттерного перехода $C_э = 20$ пФ.

Время рассасывания $t_{рас} = 0,13$ мкс.

Тепловое сопротивление переход – среда $R_{т.п-с} = 400$ °С/Вт.

6.3 Предельные эксплуатационные параметры

Максимально допустимый ток коллектора $i_{к\max} = 30$ мА.

Максимально допустимый импульсный ток коллектора $i_{к\text{ и } \max} = 60$ мА.

Максимально допустимое напряжение коллектор – база при $i_э = 0$ $u_{к-60} = 30$ В.

Максимально допустимое напряжение коллектор – эмиттер при сопро-
тивлении между эмиттером и базой 100 кОм $u_{к-э} = 30$ В.

Постоянное напряжение эмиттер – база при $i_к = 0$ $u_{э-60} = 4$ В.

Постоянная рассеиваемая мощность коллектора при температуре окру-
жающей среды $T = 60$ °С $P_{к\max} = 225$ мВт.

Предельная температура перехода $T_{п\max} = 150$ °С.

Предельная температура корпуса прибора $T_{к\max} = 125$ °С.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Цель работы: экспериментальное исследование и анализ входных, выходных характеристик и характеристик управления биполярного транзистора *n-p-n*-типа, включенного по схеме с ОЭ; определение *h*-параметров.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1 Изучить теоретические сведения [см. подразд. 2.2–2.6].

2 Ознакомиться с принципиальными электрическими схемами, приведенными на лицевой панели лабораторной установки. При исследовании статических характеристик необходимо руководствоваться схемами, приведенными на рисунках 1, 3, 5, 7. Собирать схему исследования следует с помощью короткозамкнутых переключек (КЗП). Также следует помнить, при эксплуатации транзисторов **запрещается** разрывать цепь базы, если не выключено питание цепи коллектора.

3 Исследование входных статических характеристик.

3.1 С помощью короткозамкнутых переключек собрать схему, представленную на рисунке 1 (в случае использования одного комбинированного прибора следует устанавливать в схеме КЗП вместо отключенного миллиамперметра; **запрещается** устанавливать КЗП вместо вольтметров). В этой схеме: *PA1* измеряет входной ток i_b (0–250 мкА), *PV1* измеряет входное напряжение $u_{б-э}$ (0–1 В), *PV2* измеряет выходное напряжение $u_{к-э}$ (0–15 В). В качестве потенциометров схемы (см. рисунок 1) *R3*, *R5* использовать *RP2*, *RP3* лабораторной установки соответственно.

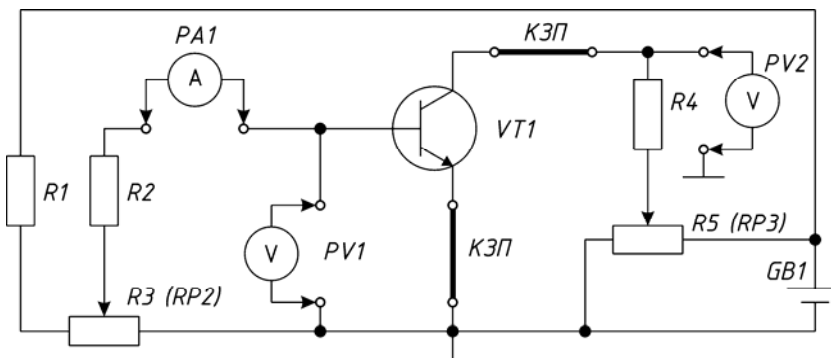


Рисунок 1 – Схема исследования входных характеристик

3.2 Установить ручки потенциометров *R3* и *R5* в крайнее левое положение и, с разрешения преподавателя, включить установку тумблером «СЕТЬ».

3.3 При фиксированных значениях выходного напряжения $u_{к-э}$, которые задаются ручкой потенциометра $R5$, изменяя ручкой потенциометра $R3$ входное напряжение $u_{б-э}$, измерить входной ток $i_б$. Значения $u_{к-э}$ задаются преподавателем (четыре значения из диапазона 0–12 В). Значения $u_{б-э}$ выбираются студентом при измерении (несколько значений из диапазона 0–0,7 В).

З а м е ч а н и е – $i_б = 0$ до тех пор пока $u_{б-э} < 0,5$ В.

3.4 Полученные результаты измерений занесите в таблицу 1.

Т а б л и ц а 1 – Результаты измерения входных характеристик транзистора

Номер измерения	$u_{б-э}$, В	$i_б$, мА	$u_{к-э}$, В
	⋮	⋮	

3.5 По данным таблицы 1 на координатной плоскости (рисунок 2) построить семейство входных характеристик биполярного транзистора (четыре измеренные характеристики), включенного по схеме с ОЭ: $i_б = f(u_{б-э})$ при $u_{к-э} = \text{const}$. На каждой из характеристик подписать значение $u_{к-э}$.

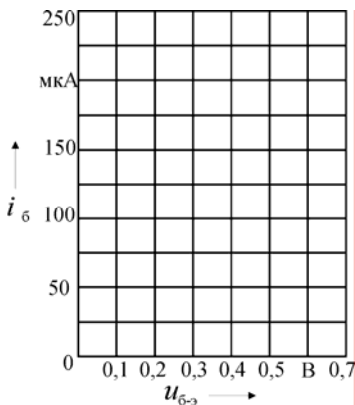


Рисунок 2 – Координатная плоскость для семейства входных характеристик

4.2 Установить ручки потенциометров $R3$, $R4$, $R6$ в крайнее левое положение и, с разрешения преподавателя, включить установку тумблером «СЕТЬ».

4.3 При фиксированных значениях входного тока $i_б$ (задаются потенциометрами $R3$ и $R4$; $R4$ осуществляет грубую настройку, $R3$ – более точную) измерить выходной $i_к$ при различных значениях выходного напряжениях $u_{к-э}$ (задаются ручкой потенциометра $R6$). Значения $i_б$ задаются преподавателем (несколько из диапазона 0–100 мкА). Значения $u_{к-э}$ выбираются студентом при измерении (несколько значений из диапазона 0–12 В).

3.6 Сделать выводы о влиянии выходного $u_{к-э}$ и входного $u_{б-э}$ напряжений на входной ток $i_б$.

3.7 Установить ручки потенциометров в исходное положение и выключить установку.

4 Исследование выходных статических характеристик.

4.1 Используя КЗП, собрать схему, представленную на рисунке 3. В этой схеме: $PA1$ измеряет входной ток $i_б$ (0–200 мкА), $PA2$ измеряет выходной ток $i_к$ (0–100 мА), $PV2$ измеряет выходное напряжение $u_{к-э}$ (0–15 В). В качестве потенциометров схемы (см. рисунок 3) $R3$, $R4$, $R6$ использовать $RP2$, $RP1$, $RP3$ лабораторной установки соответственно.

Замечание – При малых токах $i_{\text{б}}$ шаг изменения $u_{\text{к-э}}$ выбрать относительно небольшой. Значения $u_{\text{к-э}}$ следует изменять от большего к меньшему (от 12 до 0 В).

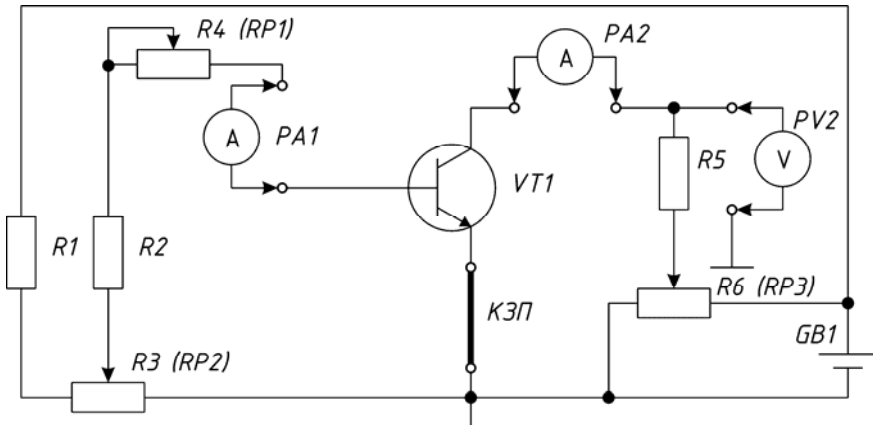


Рисунок 3 – Схема исследования выходных характеристик

4.4 Полученные результаты измерений занести в таблицу 2.

4.5 По данным таблицы 2 на координатной плоскости (рисунок 4) построить семейство выходных характеристик биполярного транзистора (четыре измеренные характеристики), включенного по схеме с ОЭ: $i_{\text{к}} = f(u_{\text{к-э}})$ при $i_{\text{б}} = \text{const}$. На каждой из характеристик подписать значение $i_{\text{б}}$.

4.6 Сделать выводы о влиянии выходного напряжения $u_{\text{к-э}}$ и входного тока $i_{\text{б}}$ на выходной ток $i_{\text{к}}$.

4.7 Установить ручки потенциометров в исходное положение и выключить установку.

Таблица 2 – Результаты измерения выходных характеристик транзистора

Номер измерения	$u_{\text{к-э}}$, В	$i_{\text{к}}$, мА	$i_{\text{б}}$, мА
	⋮	⋮	

5 Исследование характеристик управления.

5.1 Исследование характеристик управления $i_{\text{к}} = f(u_{\text{б-э}})$ при $u_{\text{к-э}} = \text{const}$.

5.1.1 Используя КЗП, собрать схему (рисунок 5) для исследования характеристик управления. В этой схеме: $PV1$ измеряет входное напряжение $u_{\text{б-э}}$; $PA2$ измеряет выходной ток $i_{\text{к}}$; $PV2$ измеряет выходное напряжение $u_{\text{к-э}}$. В качестве потенциометров схемы (см. рисунок 5) $R3$, $R5$ использовать $RP2$, $RP3$ лабораторной установки соответственно.

5.1.2 Установить ручки потенциометров $R3$, $R5$ в крайнее левое положение и, с разрешения преподавателя, включить установку тумблером «СЕТЬ».

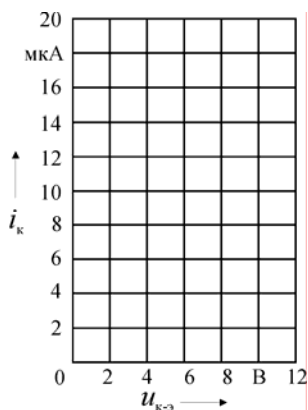


Рисунок 4 – Координатная плоскость для семейства выходных характеристик

построить семейство характеристик управления биполярного транзистора (четыре измеренные характеристики), включенного по схеме с ОЭ: $i_k = f(u_{б-э})$ при $u_{к-э} = \text{const}$. На каждой из характеристик подписать значение $u_{к-э}$.

5.1.3 При фиксированных значениях выходного напряжения $u_{к-э}$, которые задаются ручкой потенциометра $R5$, изменяя ручкой потенциометра $R3$ входное напряжение $u_{б-э}$, измерить выходной ток i_k . Значения $u_{к-э}$ задаются преподавателем (четыре значения из диапазона 0–12 В). Значения $u_{б-э}$ выбираются студентом при измерении (несколько значений из диапазона 0–0,7 В).

З а м е ч а н и е – $i_k = 0$, до тех пор пока $u_{б-э} < 0,5$ В.

5.1.4 Полученные результаты измерений занесите в таблицу 3.

5.1.5 По данным таблицы 3 на координатной плоскости (рисунок 6)

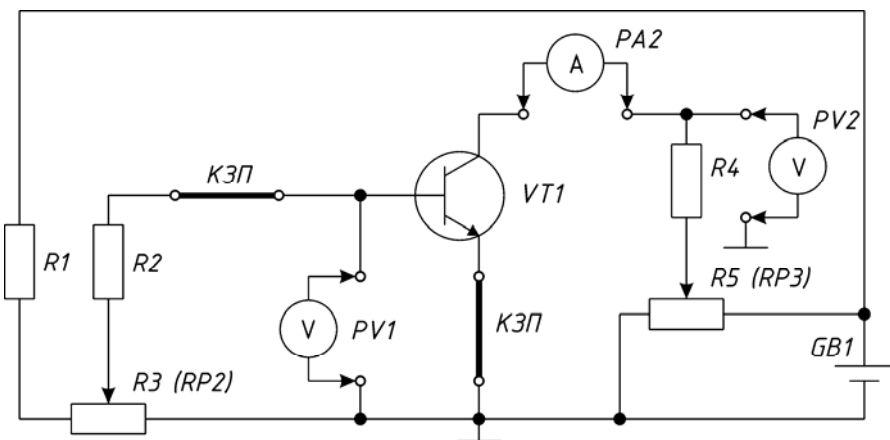


Рисунок 5 – Схема исследования характеристик управления $i_k = f(u_{б-э})$, при $u_{к-э} = \text{const}$

Т а б л и ц а 3 – Результаты измерения характеристик управления $i_k = f(u_{б-э})$ при $u_{к-э} = \text{const}$

Номер измерения	$u_{б-э}$, В	i_k , мА	$u_{к-э}$, В
	⋮	⋮	

5.1.6 Сделать выводы о зависимости выходного тока i_k от выходного u_{k-3} и входного u_{6-3} напряжений.

5.1.7 Установить ручки потенциометров в исходное положение и выключить установку.

5.2 Исследование характеристик управления $i_k = f(i_6)$ при $u_{k-3} = \text{const}$.

5.2.1 Используя КЗП, собрать схему, представленную на рисунке 7. В этой схеме: *PA1* измеряет входной ток i_6 (0–100 мкА), *PA2* измеряет выходной ток i_k (0–100 мА), *PV2* измеряет выходное напряжение u_{k-3} (0–15 В). В качестве потенциометров схемы (рисунок 7) *R3, R4, R6* использовать *RP2, RP1, RP3* лабораторной установки соответственно.

5.2.2 Установить ручки потенциометров *R3, R4, R6* в крайнее левое положение и, с разрешения преподавателя, включить установку тумблером «СЕТЬ».

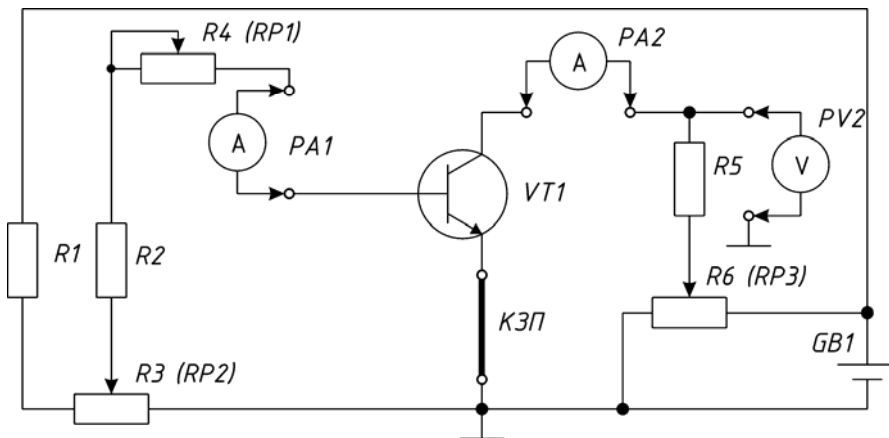


Рисунок 7 – Схема исследования характеристик управления $i_k = f(i_6)$, при $u_{k-3} = \text{const}$

5.2.3 При фиксированных значениях выходного напряжения u_{k-3} (задаются ручкой потенциометра *R6*) измерить выходной ток i_k при различных значениях входного тока i_6 (задаются потенциометрами *R3* и *R4*; *R3* осуществляет грубую настройку, *R4* – более точную). Значения u_{k-3} задаются преподавателем (несколько значений из диапазона 0–12 В). Значения i_6 выбираются студентом при измерении (несколько из диапазона 0–100 мкА).

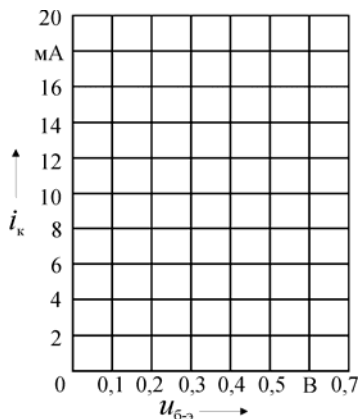


Рисунок 6 – Координатная плоскость для семейства характеристик управления $i_k = f(u_{6-3})$ при $u_{k-3} = \text{const}$

5.2.4 Полученные результаты измерений занести в таблицу 4.

Т а б л и ц а 4 – Результаты измерения характеристик управления $i_k = f(i_б)$ при $u_{к-э} = \text{const}$

Номер измерения	$i_б$, мкА	i_k , мА	$u_{к-э}$, В
	⋮	⋮	

5.2.5 По данным таблицы 4 на координатной плоскости (рисунок 8) построить семейство характеристик управления биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ (четыре измеренные характеристики): $i_k = f(i_б)$ при $u_{к-э} = \text{const}$. На каждой из характеристик подписать значение $u_{к-э}$.

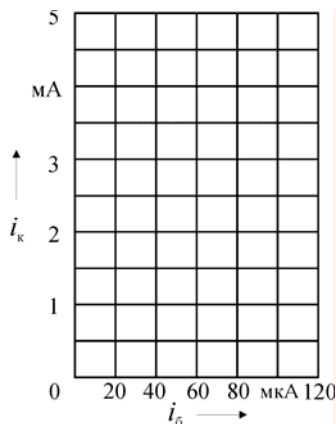


Рисунок 8 – Координатная плоскость для характеристик семейства управления $i_k = f(i_б)$ при $u_{к-э} = \text{const}$

8 На отдельном рисунке в отчете привести семейство выходных характеристик. Построить область безопасной работы. При построении ОБР следует ориентироваться на рисунок 10 (см. подразд. 2.5.2 теоретических сведений) и справочные данные транзистора.

9 Сделать выводы о назначении ОБР.

10 Представить измеренные и расчетные данные преподавателю на подпись.

11 Оформить отчет.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1 Название лабораторной работы.

2 Цель лабораторной работы.

3 Электрические принципиальные схемы исследования статических характеристик, согласно рисункам 1, 3, 5 и 7 и нормам ГОСТов и ЕСКД.

4 Измеренные данные в виде таблиц 1–4.

5 Статические характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ, согласно рисункам 2, 4, 6, 8 и измеренным данным.

6 Расчет h -параметров биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ, на основе семейств входных и выходных характеристик и по соответствующим формулам.

7 Отдельно нарисованное семейство выходных характеристик с представленной ОБР.

8 Ответы на контрольные вопросы (по заданию преподавателя).

9 Аргументированные выводы по выполненной работе.

Лабораторная работа №2

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВНОГО ТРАНЗИСТОРА – ПАРЫ ДАРЛИНГТОНА

Цель работы: экспериментальное исследование и анализ семейства выходных характеристик составного транзистора, определение h -параметров. Сравнение характеристик одиночного и составного транзисторов.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1 Изучить теоретические сведения [см. подразд. 2.3, 2.4, 2.6, 3].

2 Исследование входных характеристик составного транзистора.

2.1 С помощью короткозамкнутых перемычек (КЗП) собрать схему, представленную на рисунке 1 (в случае использования одного комбинированного прибора следует устанавливать в схеме КЗП вместо отключенного миллиамперметра; **з а п р е щ а е т с я** устанавливать КЗП вместо вольтметров). В этой схеме: $PA1$ измеряет входной ток i_b (0–250 мкА), $PV1$ измеряет входное напряжение $u_{б-э}$ (0–2 В), $PV2$ измеряет выходное напряжение $u_{к-э}$ (0–15 В). В качестве потенциометров схемы (см. рисунок 1) $R3, R5$ использовать $RP2, RP3$ лабораторной установки соответственно.

3.2 Установить ручки потенциометров $R3$ и $R5$ в крайнее левое положение и, с разрешения преподавателя, включить установку тумблером "СЕТЬ".

3.3 При фиксированных значениях выходного напряжения $u_{к-э}$, которые задаются ручкой потенциометра $R5$, изменяя ручкой потенциометра $R3$ входное напряжение $u_{б-э}$, измерить входной ток i_b . Значения $u_{к-э}$ задаются преподавателем (четыре значения из диапазона 0–12 В). Значения $u_{б-э}$ выбираются студентом при измерении (несколько значений из диапазона 0–1,6 В).

З а м е ч а н и е – $i_b = 0$ до тех пор пока $u_{б-э} < 0,5$ В.

3.4 Полученные результаты измерений занести в таблицу 1.

3.5 По данным таблицы 1 на координатной плоскости (рисунок 2) построить семейство входных характеристик составного транзистора (четыре измеренные характеристики): $i_{\text{б}} = f(u_{\text{б-э}})$ при $u_{\text{к-э}} = \text{const}$. На каждой из характеристик подписать значение $u_{\text{к-э}}$.

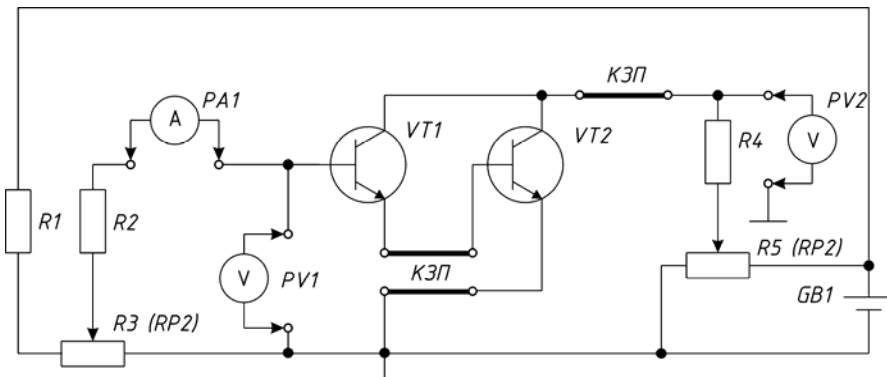


Рисунок 1 – Схема исследования входных характеристик составного транзистора

Таблица 1 – Результаты измерения входных характеристик составного транзистора

Номер измерения	$u_{\text{б-э}}, \text{В}$	$i_{\text{б}}, \text{мА}$	$u_{\text{к-э}}, \text{В}$
	⋮	⋮	

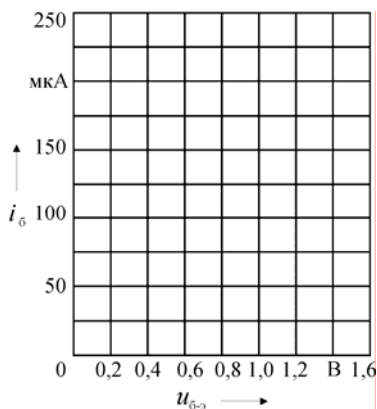


Рисунок 2 – Координатная плоскость для семейства входных характеристик

3.6 Сделать выводы о влиянии выходного $u_{\text{к-э}}$ и входного $u_{\text{б-э}}$ напряжений на входной ток $i_{\text{б}}$.

3.7 Установить ручки потенциометров в исходное положение и выключить установку.

4 Исследование выходных статических характеристик.

4.1 Используя КЗП, соберите схему, представленную на рисунке 3. В этой схеме: $PA1$ измеряет входной ток $i_{\text{б}}$ (0–200 мкА), $PA2$ измеряет выходной ток $i_{\text{к}}$ (0–100 мА), $PV2$ измеряет выходное напряжение $u_{\text{к-э}}$ (0–15 В). В качестве потенциометров схемы (см. рисунок 3) $R3, R4, R6$ использовать $RP2, RP1, RP3$ лабораторной установки соответственно.

4.2 Установить ручки потенциометров $R3$, $R4$, $R6$ в крайнее левое положение и, с разрешения преподавателя, включить установку тумблером «СЕТЬ».

4.3 При фиксированных значениях входного тока i_6 (задаются потенциометрами $R3$ и $R4$; $R4$ осуществляет грубую настройку, $R3$ – более точную) измерить выходной ток i_k при различных значениях выходного напряжения $u_{к-3}$ (задаются ручкой потенциометра $R6$). Значения i_6 задаются преподавателем (несколько из диапазона 0–200 мкА). Значения $u_{к-3}$ выбираются студентом при измерении (несколько значений из диапазона 0–12 В).

З а м е ч а н и е – При малых токах i_6 шаг изменения $u_{к-3}$ выбрать относительно небольшой. Значения $u_{к-3}$ следует изменять от большего к меньшему (от 12 до 0 В).

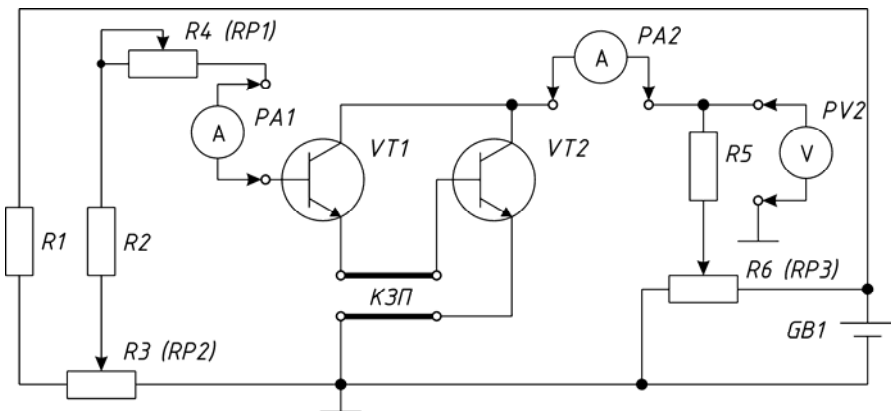


Рисунок 3 – Схема исследования выходных характеристик составного транзистора

4.4 Полученные результаты измерений занести в таблицу 2.

4.5 По данным таблицы 2 на координатной плоскости (рисунок 4) построить семейство выходных характеристик составного транзистора (четыре измеренные характеристики): $i_k = f(u_{к-3})$ при $i_6 = \text{const}$. На каждой из характеристик подписать значение i_6 .

4.6 Сделать выводы о влиянии выходного напряжения $u_{к-3}$ и входного тока i_6 на выходной ток i_k .

4.7 Установить ручки потенциометров в исходное положение и выключить установку.

Т а б л и ц а 2 – Результаты измерения выходных характеристик составного транзистора

Номер измерения	$u_{к-3}$, В	i_k , мА	i_6 , мА
	⋮	⋮	

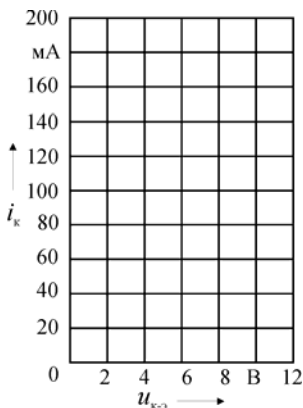


Рисунок 4 – Координатная плоскость для семейства выходных характеристик

в виде таблицы 3. Сделать выводы.

8 Представить измеренные и расчетные данные преподавателю на подпись.

9 Оформить отчет.

Таблица 3 – Сравнение h -параметров составного и одиночного транзисторов

Схема	h -параметры			
	Входное сопротивление, h_{11}	Коэффициент обратной связи, h_{12}	Коэффициент усиления по току, h_{21}	Выходная проводимость, h_{22}
С транзистором – одиночным – составным				

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1 Название лабораторной работы.

2 Цель лабораторной работы.

3 Электрические принципиальные схемы исследования составного транзистора, согласно рисункам 1, 3 и нормам ГОСТов и ЕСКД.

4 Измеренные и расчетные данные в виде таблиц 1, 2.

5 Входные характеристики составного транзистора, согласно рисунку 2 и измеренным данным.

6 Выходные характеристики одиночного транзистора из лабораторной работы № 1.

7 Выходные характеристики составного транзистора, согласно рисунку 4 и измеренным данным.

8 Выходные характеристики одиночного транзистора из лабораторной работы № 1.

9 Расчет h -параметров составного транзистора на семействах входных и выходных характеристик и по соответствующим формулам.

10 Сравнение h -параметров составного и одиночного транзисторов в виде таблицы 3.

5 На измеренных входных и выходных характеристиках с помощью формул (7)–(10) и рисунка 9 (см. подразд. 2.5.2 теоретических сведений) произвести расчет h -параметров составного транзистора. Полученные значения занести в отчет.

6 Сравнить входные и выходные характеристики для составного и одиночного транзисторов (см. лабораторную работу № 1). Сделать выводы.

7 Сравнить полученные значения h -параметров для составного и одиночного транзисторов (см. лабораторную работу № 1). Результаты сравнения представить

11 Ответы на контрольные вопросы (по заданию преподавателя).

12 Аргументированные выводы по выполненной работе.

Лабораторная работа №3

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

Цель работы: экспериментальное исследование и анализ работы усилительного каскада, выполненного на биполярном транзисторе $n-p-n$ -типа по схеме с общим эмиттером, и определение его параметров.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1 Изучить теоретические сведения [см. подразд. 2.3, 2.6, 4.1–4.3, 5.1–5.4].

2 Используя КЗП, собрать схему (рисунок 1) усилительного каскада. В этой схеме: $PA1$ измеряет ток делителя i_d ; $PA2$ – ток коллектора i_k . В качестве резисторов схемы (см. рисунок 1) $R1$ – $R5$ следует использовать $R1$, $RP1$, $R2$, $R3$, $R5$ лабораторной установки соответственно.

3 Измерить величину напряжения источника питания $GB1$. Значение напряжения источника ЭДС $GB1$ занести в отчет.

4 Задать положения рабочей точки транзистора VTI . Для этого с помощью потенциометра $R2$ установить потенциал коллектора, равный половине напряжения источника ЭДС (измерение потенциала коллектора в контрольной точке B произвести относительно корпуса с помощью вольтметра).

5 Измерить ток делителя i_d , статический ток коллектора i_{k0} , напряжения база – эмиттер $u_{б-э0}$, коллектор – эмиттер $u_{к-э0}$, коллектор – база $u_{к-б0}$ в статическом режиме. Измеренные значения занести в отчет.

6 Исследование работы усилительного каскада.

6.1 На вход усилительного каскада подать непрерывный синусоидальный сигнал (используя КЗП, соединить выход генератора GI с входом усилителя, тумблер $SA1$ установить в положение « \sim »; при необходимости воспользоваться внешним генератором). Подключить осциллограф к контрольной точке A и задать амплитуду входного сигнала $U_{m\text{ вх}} = 10$ мВ с помощью потенциометра схемы $R6$ ($PR1$). Регулированием осциллографа добиться устойчивого изображения на экране одного периода выходного сигнала.

6.2 Измерить амплитуду напряжения на выходе усилительного каскада $U_{m\text{ вых}}$, подключив осциллограф к выходу схемы. Осциллограммы входного и выходного напряжений представить на одном графике и занести в отчет. Отключить осциллограф от схемы.

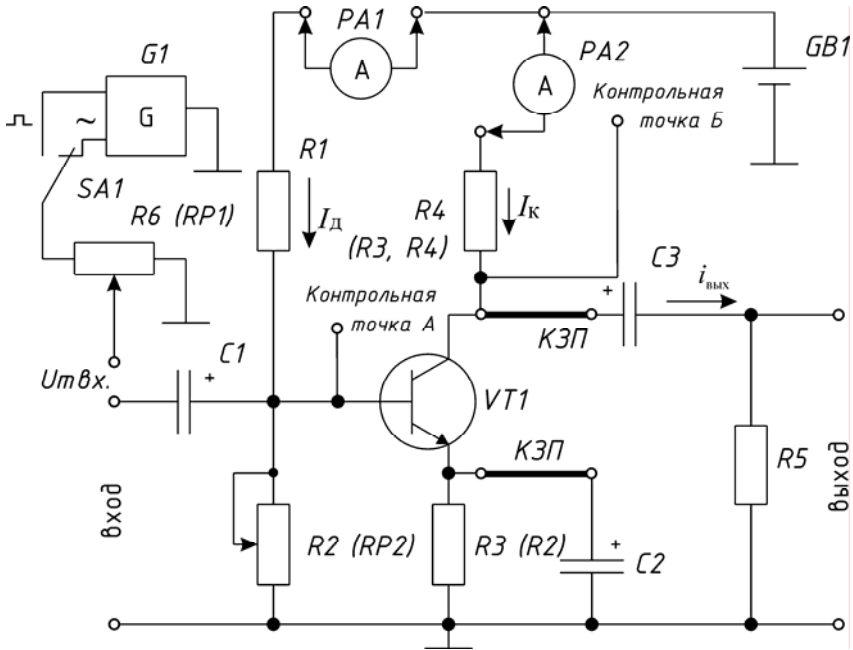


Рисунок 1 – Схема исследования усилительного каскада с ОЭ

6.3 Рассчитать коэффициенты усиления по напряжению усилительного каскада как в относительных величинах ($K_U = U_{m\text{ вых}}/U_{m\text{ вх}}$), так и в децибелах ($K_{U\text{ дБ}} = 20\lg K_U$).

6.4 Измерить выходной ток усилителя $I_{\text{вых}}$. Для этого вместо КЗП, последовательно включенной с конденсатором C_3 , подключить миллиамперметр.

6.5 Рассчитать выходное сопротивление усилителя $R_{\text{вых}} = U_{m\text{ вых}} / \sqrt{2} I_{\text{вых}}$.

6.6 Вместо резистора R_3 лабораторной установки подключить в цепь коллектора резистор R_4 и повторить пп. 6.2–6.5.

6.7 Результаты измерений и расчета занести в таблицу 1. Номиналы резисторов R_3 и R_4 лабораторной установки также занести в отчет.

Таблица 1 – Параметры усилительного каскада с ОЭ

Варианты схемы	$U_{m\text{ вх}}$	$U_{m\text{ вых}}$	K_U	$K_{U\text{ дБ}}$	$I_{\text{вых}}$, мА	$R_{\text{вых}}$, кОм	$f_{н.гр}$	$f_{в.гр}$	Δf	$f_{ш}$	$f_{шв}$	M (1 кГц)
	В											
При $R_3 =$ кОм												
При $R_4 =$ кОм												

6.8 Изменить резистор в коллекторной цепи лабораторной установки с R_4 на R_3 . Сделать выводы о влиянии изменения сопротивления в цепи коллектора на работу усилительного каскада.

7 Измерение амплитудной характеристики (АХ) усилителя.

7.1 Для этого необходимо подать на вход усилителя от внутреннего генератора GI непрерывный сигнал синусоидальной формы (при необходимости воспользоваться внешним генератором). Изменяя значение входного напряжения с шагом 0,01 В, измерить значение выходного напряжения, подключив вольтметр к выходу схемы. При этом значение напряжения входного сигнала следует контролировать между контрольной точкой A и общим корпусом.

7.2 Рассчитать коэффициенты усиления K_U и $K_{УдБ}$. Данные занести в таблицу 2.

Таблица 2 – Амплитудная характеристика (АХ) усилительного каскада с ОЭ

$U_{m\text{ вх}}$, В	0	0,01	...	0,1
$U_{m\text{ вых}}$, В				
K_U				
$K_{УдБ}$, дБ				

7.3 По результатам измерений построить амплитудную характеристику усилителя (рисунок 2). На характеристике отметить рабочий участок и определить динамический диапазон усилителя D .

7.4 Вместо резистора $R3$ лабораторной установки подключить в цепь коллектора резистор $R4$ и повторить пп. 7.2, 7.3. Амплитудные характеристики при разных резисторах в цепи коллектора представить на одном графике.

7.5 Изменить резистор в коллекторной цепи лабораторной установки с $R4$ на $R3$, отключить внешний генератор от входа лабораторной установки. Сделать выводы о влиянии изменения сопротивления в цепи коллектора на АХ усилительного каскада.

8 Измерение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) усилителя.

8.1 Для этого необходимо подключить параллельно ко входу схемы (см. рисунок 1) внешний генератор непрерывных сигналов переменной частоты; при этом внутренний генератор GI отключить от схемы. Установить действующее значение напряжения входного сигнала в контрольной точке A , равной 0,01 В.

8.2 Изменяя частоту входного сигнала с дискретностью от 10 Гц до 1 МГц (при снятии характеристики в областях граничных частот, где происходит заметное изменение выходного напряжения, дискретность изменения частоты входного сигнала необходимо уменьшить), измерить действующее значение напряжения выходного сигнала. Рассчитать коэффициент усиления, как в относительных величинах, так и в децибелах. Данные занести в таблицу 3.

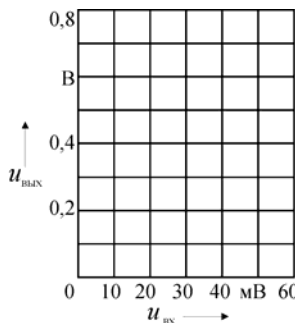


Рисунок 2 – Амплитудная характеристика усилительного каскада с ОЭ

8.3 Экспериментальным путем определить частоты единичного усиления $f_{1н}$ и $f_{1в}$. Полученные значения занести в таблицу 1.

Пр и м е ч а н и е – При частоте единичного усиления коэффициент усиления $K_{UдБ} = 0$ дБ ($K_U = 1$), то есть выходной сигнал $U_{вых}$ равен входному $U_{вх}$.

Т а б л и ц а 3 – Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) усилительного каскада с ОЭ

№ измерения	1	2	...	10
f , кГц				
$U_{м\text{ вых}}$, В				
K_U				
$K_{UдБ}$, дБ				

8.4 Результаты измерений и расчетов нанести на координатную плоскость (рисунок 3) и построить амплитудно-частотную характеристику усилителя. По характеристике определить граничные частоты $f_{н. гр}$, $f_{в. гр}$ и полосу пропускания Δf . Рассчитать коэффициент частотных искажений M на частоте $f = 1$ кГц. Полученные значения занести в таблицу 1 и указать на АЧХ.

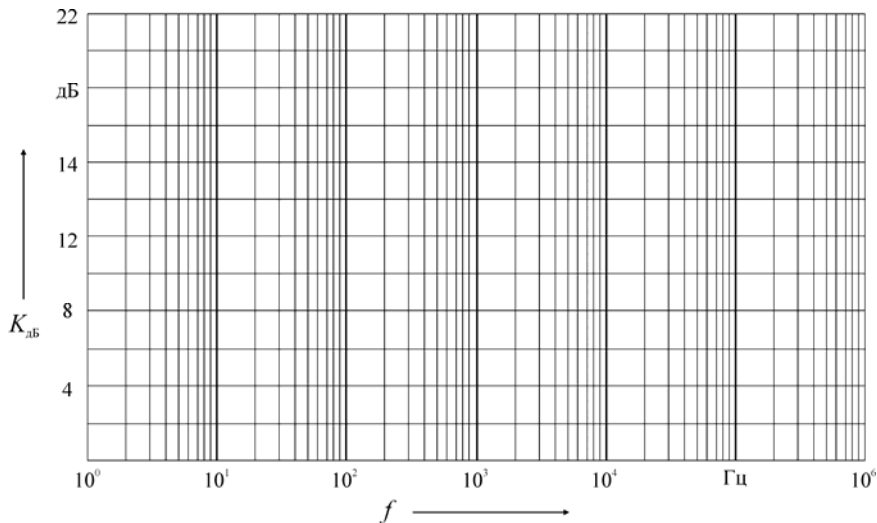


Рисунок 3 – Амплитудно-частотная характеристика усилительного каскада с ОЭ

8.5 Вместо резистора лабораторной установки $R3$ подключить в цепь коллектора резистор $R4$ и повторить пп. 8.2–8.4. Амплитудно-частотные характеристики при разных резисторах в цепи коллектора представить на одном графике.

8.6 Изменить резистор в коллекторной цепи лабораторной установки с $R4$ на $R3$, отключить внешний генератор от входа лабораторной установки. Сделать выводы о влиянии изменения сопротивления в цепи коллектора на АЧХ усилительного каскада.

9 Исследование усиления несинусоидальных сигналов.

9.1 Подключить ко входу усилителя генератор GI и установить переключатель $SA1$ в положение «Г». Подключить осциллограф к входу схемы и задать амплитуду входного сигнала, $U_{m\text{ вх}} = 0,01$ В. Воспользовавшись органами управления осциллографа, добиться устойчивого изображения на экране одного периода выходного сигнала.

9.2 Измерить амплитуду напряжения на выходе усилительного каскада $U_{m\text{ вых}}$. Осциллограммы входного и выходного напряжений представить на одном графике и занести в отчет. Сделать вывод.

10 Представить измеренные и расчетные данные преподавателю на подпись.

11 Оформить отчет.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1 Название лабораторной работы.

2 Цель лабораторной работы.

3 Электрическая принципиальная схема исследования усилительного каскада с ОЭ, согласно рисунку 1 и требованиям ГОСТов и ЕСКД. Указать номиналы резисторов, конденсаторов исследуемой схемы.

4 Значение напряжения источника питания $GB1$.

5 Измеренные значения $i_{д}, i_{к0}, u_{б-э0}, u_{к-э0}, u_{к-б0}$.

6 Осциллограммы входных и выходных синусоидальных сигналов.

7 Измеренные данные в виде таблицы 1.

8 Измеренные данные АХ в виде таблицы 2.

9 Амплитудная характеристика, согласно рисунку 2, с отмеченным динамическим диапазоном.

10 Измеренные данные АЧХ в виде таблицы 3.

11 Амплитудно-частотная характеристика, согласно рисунку 3, с отмеченными граничными частотами $f_{н. гр}, f_{в. гр}$ и полосой пропускания Δf , частотами единичного усиления $f_{1н}$ и $f_{1в}$.

12 Осциллограммы входных и выходных прямоугольных сигналов.

13 Ответы на контрольные вопросы (по заданию преподавателя).

14 Аргументированные выводы по выполненной работе.

Лабораторная работа №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИТТЕРНОГО ПОВТОРИТЕЛЯ

Цель работы: экспериментальное исследование и анализ работы усилительного каскада, выполненного на биполярном транзисторе $n-p-n$ -типа по схеме с общим коллектором, определение его параметров.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1 Изучить теоретические сведения [см. подразд. 2.3, 2.6, 4.1, 4.4, 5.1–5.4].

2 Используя КЗП, собрать схему (рисунок 1) эмиттерного повторителя. В качестве элементов схемы (см. рисунок 1) резисторов $R1$ – $R4$ и конденсатора $C2$ следует использовать $R1$, $RP1$, $R2$, $R5$ и $C3$ лабораторной установки соответственно.

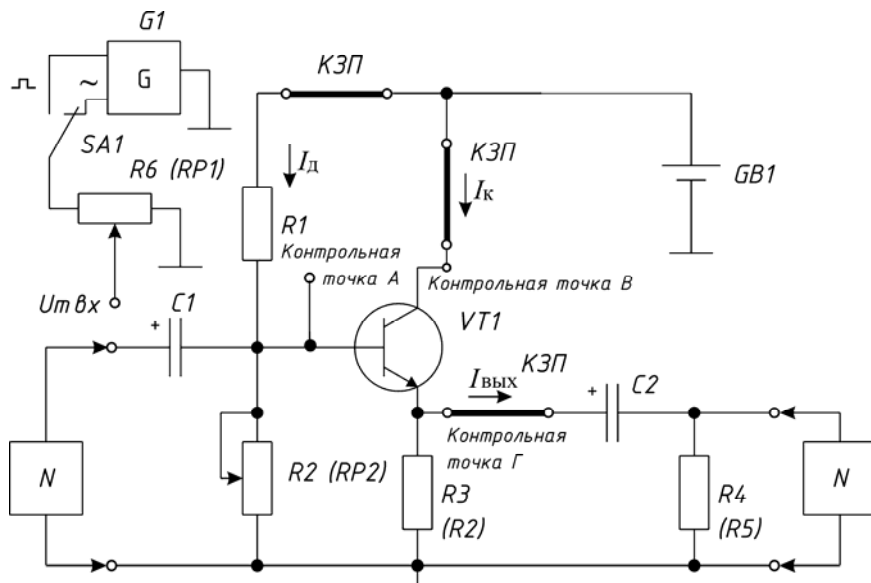


Рисунок 1 – Схема исследования эмиттерного повторителя

3 Измерить величину напряжения источника питания $GB1$. Значение напряжения источника ЭДС $GB1$ занести в отчет.

4 Задать положения рабочей точки транзистора $VT1$. Для этого с помощью потенциометра $R2$ ($RP1$) установить напряжение смещения базы, равное 0,5–0,7 В (измерение произвести между контрольными точками A и Γ с помощью вольтметра).

5 Измерить ток делителя $i_{\text{д}}$, статический ток коллектора $i_{\text{к}}$, напряжения база – эмиттер $u_{\text{б-э}0}$, коллектор – эмиттер $u_{\text{к-э}0}$, коллектор – база $u_{\text{к-б}0}$ в статическом режиме. Измеренные значения занести в отчет.

6 Исследование работы усилительного каскада.

6.1 На вход усилительного каскада подать непрерывный синусоидальный сигнал (используя КЗП, соединить выход генератора $G1$ с входом усилителя, тумблер $SA1$ установить в положение «~»). Подключить осциллограф к контрольной точке A и задать амплитуду входного сигнала $U_{\text{м вх}} = 10$ мВ с помо-

щью потенциометра схемы $R6$ ($PR1$). Регулированием осциллографа добиться устойчивого изображения на экране одного периода выходного сигнала.

6.2 Измерить амплитуду напряжения на выходе усилительного каскада $U_{m\text{ вых}}$, подключив осциллограф к выходу схемы. Осциллограммы входного и выходного напряжений представить на одном графике и занести в отчет. Отключить осциллограф от схемы.

6.3 Рассчитать коэффициенты усиления по напряжению усилительного каскада, как в относительных величинах ($K_U = U_{m\text{ вых}}/U_{m\text{ вх}}$), так и в децибелах ($K_{U\text{ дБ}} = 20\lg K_U$).

6.4 Измерить выходной ток усилителя $I_{\text{вых}}$. Для этого вместо КЗП, последовательно включенной с конденсатором $C2$ ($C3$ лабораторного макета), подключить миллиамперметр.

6.5 Рассчитать выходное сопротивление усилителя $R_{\text{вых}} = U_{m\text{ вых}}/\sqrt{2} I_{\text{вых}}$.

6.6 Результаты измерений и расчета занести в таблицу 1.

Таблица 1 – Параметры усилительного каскада с ОК

Вариант	$U_{m\text{ вх}}$	$U_{m\text{ вых}}$	K_U	$K_{U\text{ дБ}}$	$I_{\text{вых}}$ мА	$R_{\text{вых}}$ кОм
	В					
Схема с ОК						
Схема с ОЭ						

6.7 В таблицу также занести аналогичные параметры усилительного каскада с ОЭ, измеренные в предыдущей работе.

6.8 Сделать выводы о работе усилительного каскада с ОК.

7 Измерение амплитудной характеристики (АХ) усилителя.

7.1 Для этого необходимо подать на вход усилителя с внутреннего генератора $G1$ непрерывный сигнал синусоидальной формы (при необходимости воспользоваться внешним генератором).

7.2 Изменяя значение входного напряжения с шагом 0,01 В, измерить значение выходного напряжения, подключив вольтметр к выходу схемы. При этом значение входного напряжения следует контролировать между контрольной точкой A и общим корпусом. Рассчитать коэффициент усиления. Данные занести в таблицу 2.

Таблица 2 – Амплитудная характеристика усилительного каскада с ОК

$U_{m\text{ вх}}$, В	0	0,01	...	0,1
$U_{m\text{ вых}}$, В				
K_U				
$K_{U\text{ дБ}}$				

7.3 По результатам измерений построить амплитудную характеристику усилителя (рисунок 2). На характеристике отметить рабочий участок и определить динамический диапазон усилителя D .

7.4 Сделать выводы о работе усилительного каскада с ОК.

8 Исследование усиления несинусоидальных сигналов.

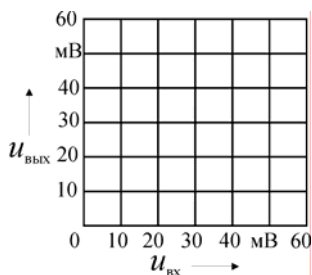


Рисунок 2 – Амплитудная характеристика усилительного каскада с ОК

фиге и занести в отчет. Сделать выводы.

- 9 Представить измеренные и расчетные данные преподавателю на подпись.
- 10 Оформить отчет.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1 Название лабораторной работы.
- 2 Цель лабораторной работы.
- 3 Электрическая принципиальная схема исследования усилительного каскада с ОК, согласно рисунку 1 и требованиям ГОСТов и ЕСКД. Указать номиналы резисторов, конденсаторов исследуемой схемы.
- 4 Значение напряжения источника питания GBI .
- 5 Измеренные значения i_d , i_k , $u_{б-э0}$, $u_{к-э0}$, $u_{к-б0}$.
- 6 Осциллограммы входных и выходных синусоидальных сигналов
- 7 Измеренные данные параметров каскада в виде таблицы 1.
- 8 Измеренные данные АХ в таблице 2.
- 9 Амплитудная характеристика, согласно рисунку 2, с отмеченным динамическим диапазоном.
- 10 Осциллограммы входных и выходных прямоугольных сигналов.
- 11 Ответы на контрольные вопросы (по заданию преподавателя).
- 12 Аргументированные выводы по выполненной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Что такое транзистор?
- 2 По каким признакам классифицируются транзисторы?
- 3 Классификация транзисторов по характеру переноса носителей заряда.
- 4 Классификация транзисторов по предельной мощности, выделяемой в коллекторном переходе.
- 5 Классификация транзисторов в зависимости от предельной частоты.
- 6 Система обозначений транзисторов согласно ОСТ 11336.919-81.
- 7 Какие полупроводниковые материалы используются для изготовления транзистора?
- 8 Как обозначаются транзисторы в зависимости от предельных мощности и частоты?

8.1 Подключить ко входу усилителя генератор GI и установить переключатель $SA1$ в положение « \square ». Подключить осциллограф к входу схемы

(контрольная точка A) и задать амплитуду входного сигнала $U_{m\text{ вх}}=0,01$ В. Регулированием осциллографа добиться устойчивого изображения на экране одного периода выходного сигнала.

8.2 Измерить амплитуду напряжения на выходе усилительного каскада $U_{m\text{ вых}}$, подключив осциллограф на выход схемы. Осциллограммы входного и выходного напряжений представить на одном гра-

- 9 Система обозначения транзисторов, разработанных до 1964 г.
- 10 Устройство биполярного транзистора.
- 11 Какие транзисторы называют биполярными?
- 12 Какие области и переходы имеются у биполярного транзистора?
- 13 Как по условному графическому изображению определить тип транзистора (*n-p-n* или *p-n-p*)?
- 14 Упрощенная схема замещения биполярных транзисторов.
- 15 Почему схема замещения, представленная на рисунке 4 (см. сведения из теории), является достаточно упрощенной схемой замещения биполярного транзистора?
- 16 Принцип работы биполярного транзистора.
- 17 Как ток коллектора зависит от тока эмиттера?
- 18 Как ток коллектора зависит от тока базы?
- 19 В чем кратце состоит принцип работы биполярного транзистора?
- 20 В каком переходе биполярного транзистора при нормальной работе возможен электрический пробой?
- 21 Возможен ли тепловой пробой транзистора?
- 22 Что такое вторичный пробой?
- 23 В чем заключается явление модуляции базы?
- 24 При каких условиях возможен эффект смыкания базы?
- 25 Режимы работа транзистора.
- 26 В качестве какого элемента выступает транзистор при работе в активном режиме?
- 27 Какая область выходной характеристики транзистора соответствует активному режиму работы? Указать на ВАХ, измеренных в лабораторных работах № 1 и 2.
- 28 Где применяется работа транзистора в инверсном режиме?
- 29 В качестве какого элемента выступает транзистор при работе в режиме насыщения?
- 30 Какая область выходной характеристики транзистора соответствует режиму насыщения? Указать на ВАХ, измеренных в лабораторных работах № 1 и 2.
- 31 В качестве какого элемента выступает транзистор при работе в режиме отсечки?
- 32 Какая область выходной характеристики транзистора соответствует режиму отсечки? Указать на ВАХ, измеренных в лабораторных работах № 1 и 2.
- 33 Каким образом превратить транзистор в коммутационный элемент?
- 34 Принцип работы транзисторного ключа.
- 35 Назначение входной и выходной цепей транзисторов.
- 36 Почему статические характеристики называются статическими?
- 37 Какие существуют семейства статических характеристик?
- 38 Общее описание статических характеристик.
- 39 Обобщенный вид статических характеристик.
- 40 В чем состоит отличие ВАХ для транзисторов различной проводимости?
- 41 Какие характеристики биполярного транзистора соответствуют ВАХ диода?
- 42 Какие режимы работы биполярного транзистора можно указать на выходной характеристике?
- 43 Что выражают входные характеристики?
- 44 Какое напряжение необходимо для открытия эмиттерного перехода?
- 45 Какой параметр выражают выходные характеристики?
- 46 Что выражают характеристики управления?
- 47 Какие сигналы называются малыми?
- 48 Назвать *h*-параметры транзистора и объяснить их физический смысл.
- 49 Какими уравнениями можно выразить зависимость между переменными токами и напряжениями с использованием *h*-параметров?
- 50 Эквивалентная схема транзистора с использованием *h*-параметров.
- 51 Как определить *h*-параметры по статическим характеристикам?
- 52 Почему параметры транзисторов, определяемые по статическим характеристикам, можно использовать лишь в случае работы транзистора на низких частотах?
- 53 Рабочие параметры транзистора.

- 54 Основные причины, вызывающие нарушение нормальной работы или выход из строя транзистора.
- 55 Предельные эксплуатационные параметры биполярных транзисторов.
- 56 В чем состоит отличие первичных пробоев от вторичных?
- 57 Основные виды пробоев в транзисторе.
- 58 В каком переходе транзистора (эмиттерном или коллекторном) возможен пробой? Почему?
- 59 Особенности лавинного пробоя в транзисторе.
- 60 Что может произойти с транзистором, если при эксплуатации разорвать цепь базы, не отключая цепь коллектора?
- 61 Параметры, описывающие лавинный пробой в транзисторе.
- 62 Причины возникновения теплового пробоя.
- 63 Параметры, описывающие тепловой пробой в транзисторе.
- 64 Как и по каким характеристикам возможно определить кривую максимальной мощности?
- 65 Причина возникновения токового пробоя.
- 66 Причины возникновения вторичного пробоя.
- 67 Что такое область безопасной работы транзистора?
- 68 Причины снижения усиления транзисторов с ростом частоты.
- 69 Как определить предельную частоту передачи тока базы?
- 70 Какая частота называется граничной?
- 71 Почему транзисторы *n-p-n*-типа являются более высокочастотными?
- 72 Основные схемы включения транзисторов.
- 73 Как определить схему включения транзистора в усилительном каскаде?
- 74 В каком режиме работает транзистор в схеме включения с общим эмиттером?
- 75 Статические характеристики транзистора в схеме с ОЭ.
- 76 Объяснить изменения входных характеристик в схеме с ОЭ при изменении выходного напряжения.
- 77 Объяснить изменения выходных характеристик в схеме с ОЭ при изменении входного тока.
- 78 Статические характеристики транзистора в схеме с ОБ.
- 79 Что отображает входная характеристика схемы с ОБ при $u_{к-б} = 0$?
- 80 Объяснить изменения входных характеристик в схеме с ОБ при изменении выходного напряжения.
- 81 Объяснить изменения выходных характеристик в схеме с ОБ при изменении входного тока.
- 82 Основные параметры, характеризующие транзистор как активный четырехполосник.
- 83 Почему в справочниках не приводятся характеристики для схемы с ОК?
- 84 Параметры и достоинства схемы с ОБ.
- 85 Почему схема с ОБ называется повторителем тока?
- 86 Параметры, достоинства и недостатки схемы с ОЭ.
- 87 Параметры и достоинства схемы с ОК.
- 88 Почему схема с ОК называется эмиттерным повторителем?
- 89 Почему наибольшее распространение получила схема с ОЭ?
- 90 Сравнить различные схемы включения транзистора в усилительные каскады и указать область применения каждой из схем.
- 91 Назначение эквивалентных схем транзистора.
- 92 Что собой представляет модель Эберса-Молла?
- 93 При каких сигналах применяется модель Эберса-Молла?
- 94 Малосигнальная эквивалентная схема.
- 95 Диапазон рабочих температур транзисторов.
- 96 Для чего применяют радиаторы?
- 97 Как с помощью омметра проверить исправность транзистора?
- 98 Как с помощью омметра определить тип транзистора по проводимости?
- 99 Что такое составной транзистор?
- 100 Принцип работы составного транзистора.
- 101 При каком условии схема составного транзистора может оказаться неработоспособной?
- 102 Где находят применение составные транзисторы?
- 103 По какой схеме включают в работу составной транзистор?

- 104 Для чего необходимо усиление электрических сигналов?
- 105 Что такое усилитель?
- 106 Обобщенная структурная схема усилителя.
- 107 В чем состоит принцип работы усилителя?
- 108 Какие элементы необходимы для работы усилителя?
- 109 Что такое усилительный элемент?
- 110 Что такое усилительный каскад?
- 111 Принцип работы электронного усилителя.
- 112 Как организуется питание от одного источника усилительного каскада на биполярном транзисторе?
- 113 Для чего необходимо напряжение смещения базы?
- 114 Каким образом осуществляется установка напряжения смещения базы?
- 115 Для чего необходимо задание потенциала коллектора, равного половине напряжения питания?
- 116 Что такое дрейф нуля?
- 117 Методы стабилизации транзисторного каскада.
- 118 В чем состоит суть метода стабилизации введением цепей ООС?
- 119 Принцип действия и схема коллекторной стабилизации.
- 120 Принцип действия и схема эмиттерной стабилизации.
- 121 Какие схемы включения транзисторов в усилительные каскады являются наиболее распространенными? Почему?
- 122 Электрическая принципиальная схема усилительного каскада с ОЭ и ее основные элементы.
- 123 Назначение входного разделительного конденсатора в схеме с ОЭ.
- 124 Почему в качестве разделительных конденсаторов применяются электролитические конденсаторы?
- 125 Как в схеме с ОЭ обеспечивается напряжение смещения базы?
- 126 Почему напряжение смещения базы составляет 0,5-0,7 В?
- 127 Назначение резистора в коллекторной цепи в схеме с ОЭ.
- 128 Как в схеме с ОЭ обеспечивается стабилизация?
- 129 Назначение конденсатора в эмиттерной цепи в схеме с ОЭ.
- 130 Принцип работы конденсатора в эмиттерной цепи в схеме с ОЭ.
- 131 Почему шунтирующий конденсатор подключается параллельно резистору в эмиттерной цепи, а не последовательно с ним?
- 132 Назначение выходного разделительного конденсатора в схеме с ОЭ.
- 133 Достоинства, недостатки и область применения усилительного каскада с ОЭ.
- 134 Электрическая принципиальная схема усилительного каскада с ОК и ее основные элементы.
- 135 Почему напряжения смещения базы для схемы с ОК такое же, как и для схемы с ОЭ?
- 136 Особенности схемы с ОК.
- 137 Область применения схемы с ОК.
- 138 Назначение резистора в эмиттерной цепи в схеме с ОК.
- 139 Почему в схеме с ОК отсутствует шунтирующий конденсатор?
- 140 Почему с схему с ОК называют эмиттерным повторителем?
- 141 Почему схема с ОБ называется повторителем тока?
- 142 Основные характеристики усилителей.
- 143 Какие коэффициенты усиления имеются у усилителей? Поясните на примере схем с ОЭ, ОК, ОБ.
- 144 Какими должны быть входное и выходное сопротивления схем при согласовании для максимальной передачи напряжения? Почему?
- 145 Какими должны быть входное и выходное сопротивления схем при согласовании для максимальной передачи мощности? Почему?
- 146 Какими должны быть входное и выходное сопротивления схем при согласовании для максимальной передачи тока? Почему?
- 147 Что выражает АХ усилителя?

- 148 Что собой представляет идеальная АХ усилителя?
- 149 Почему у реальной характеристики усилителя при отсутствии сигнала на входе ($u_{вх} = 0$) на выходе схемы имеется небольшой по уровню сигнал?
- 150 Почему в области больших сигналов АХ приобретает нелинейный характер?
- 151 Что такое динамический диапазон усилителя?
- 152 Чем ограничено максимальное выходное напряжение усилительного каскада?
- 153 Чем ограничена максимальная выходная мощность усилительного каскада?
- 154 Что такое АЧХ усилителя?
- 155 Почему идеальная АЧХ выражается прямой линией, параллельной горизонтальной оси?
- 156 Чем объясняется, что схема с ОЭ имеет малый коэффициент усиления по напряжению в области малых и высоких частот?
- 157 Что такое полоса пропускания усилителя?
- 158 Как определить полосу пропускания усилителя?
- 159 Каким образом можно сравнить АЧХ (полосу пропускания) усилителей с различным максимальным коэффициентом усиления?
- 160 Как по АЧХ оценить амплитудно-частотные искажения усилителя?
- 161 Почему схема с ОК не будет усиливать постоянное напряжение?
- 162 Почему для схемы с ОК зависимость коэффициента усиления по напряжению от частоты (АЧХ) не имеет смысла?
- 163 Назначение и область применения транзистора 2Т312Б.
- 164 Что обозначает буквенно-цифровой код транзистора 2Т312Б?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Лачин, В. И.** Электроника : учеб. пособие / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. – Ростов н/Д : Изд-во «Феникс», 2004. – 576 с.
- 2 **Булычев, А. Л.** Электронные приборы : учеб. / А. Л. Булычев, П. М. Лямин, Е. С. Тулинов. – Минск : Выш. шк., 1999. – 415 с.
- 3 **Жеребцов, И. П.** Основы электроники / И. П. Жеребцов. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
- 4 **Полупроводниковые приборы** : учеб. для вузов / Н. М. Тугов [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 264 с.
- 5 **Бриндли, К.** Карманный справочник инженера электронной техники / К. Бриндли, Дж. Карр ; пер. с англ. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2002. – 400 с.
- 6 **Тули, М.** Карманный справочник по электронике / М. Тули ; пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1993. – 176 с.
- 7 **Аналоговая и цифровая электроника (полный курс)** : учеб. для вузов / Ю. Ф. Опалчий [и др.]. – М. : Горячая линия – Телеком, 2002. – 276 с.
- 8 **Дунаев, С. Д.** Электроника, микроэлектроника и автоматика : учеб. для техникумов и колледжей ж.-д. трансп. / С. Д. Дунаев. – М. : Маршрут, 2003. – 336 с.
- 9 **Акимова, Г. Н.** Электронная техника : учеб. для техникумов и колледжей ж.-д. трансп. / Г. Н. Акимова. – М. : Маршрут, 2003. – 290 с.
- 10 **Ефимчик, М. К.** Технические средства электронных систем. Вводный курс: учеб. пособие / М. К. Ефимчик. – Минск : Тесей, 2000. – 276 с.
- 11 **Электроника** / Ю. В. Гусев [и др.]. – М. : Высш. шк., 1991. – 622 с.
- 12 **Транзисторы**: справочник / О. П. Григорьев [и др.]. – М. : Радио и связь, 1990. – 336 с.
- 13 **Нестеренко, И. И.** Цветная и кодовая маркировка радиоэлектронных компонентов отечественных и зарубежных производителей / И. И. Нестеренко. – М. : СОЛЮН-Пресс, 2003. – 128 с.
- 14 **Корис, Р.** Справочник инженера-схемотехника / Р. Корис, Х. Шмидт-Вальтер ; пер. с нем. – М. : Техносфера, 2006. – 608 с.
- 15 **Джонс, М. Х.** Электроника – практический курс / М. Х. Джонс ; пер. с англ. – М. : Техносфера, 2006. – 512 с.
- 16 **Автоматика, телемеханика и связь на транспорте** : пособие по оформлению дипломных проектов / К. А. Бочков [и др.]. – Гомель : БелГУТ, 1999. – 74 с.
- 17 **Выполнение электрических схем по ЕСКД** : справочник / С. Т. Усаченок [и др.]. – М. : Изд-во. стандартов, 1989. – 325 с.
- 18 **Митин, Г. П.** Условные обозначения в отечественных и зарубежных электрических схемах / Г. П. Митин. – М. : Изумруд, 2003. – 224 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1 Общие сведения о транзисторах.....	3
1.1 Классификация транзисторов.....	3
1.2 Система обозначений транзисторов.....	4
2 Биполярный транзистор.....	6
2.1 Устройство биполярного транзистора.....	6
2.2 Принцип работы биполярного транзистора.....	8
2.3 Режимы работы биполярного транзистора.....	10
2.4 Статические характеристики.....	11
2.5 Параметры биполярных транзисторов.....	14
2.5.1 Малосигнальные параметры.....	15
2.5.2 Справочные параметры транзисторов.....	16
2.5.3 Предельные режимы работы транзисторов.....	17
2.5.4 Частотные свойства.....	21
2.6 Основные схемы включения.....	23
2.7 Эквивалентные схемы.....	29
2.8 Особенности применения транзисторов.....	31
3 Составные транзисторы.....	33
4 Усиление с помощью биполярного транзистора.....	34
4.1 Принцип работы электронного усилителя.....	36
4.2 Схемы питания и стабилизации режима.....	37
4.3 Усилительный каскад с общим эмиттером.....	41
4.4 Усилительный каскад с общим коллектором.....	43
5 Основные характеристики усилителей.....	44
5.1 Коэффициент усиления.....	44
5.2 Входное и выходное сопротивление.....	45
5.3 Амплитудная характеристика.....	45
5.4 Амплитудно-частотная характеристика.....	46
6 Справочные данные транзистора 2Т312Б.....	47
6.1 Статические характеристики.....	48
6.2 Электрические рабочие параметры.....	48
6.3 Предельные эксплуатационные параметры.....	48
Лабораторная работа № 1 Исследование статических характеристик биполярного транзистора.....	49
Лабораторная работа № 2 Исследование составного транзистора – пары Дарлингтона.....	55
Лабораторная работа № 3 Исследование усилительного каскада с общим эмиттером.....	59
Лабораторная работа № 4 Исследование эмиттерного повторителя.....	63
Контрольные вопросы.....	66
Список рекомендуемой литературы.....	71

Учебное издание

Ермаков Сергей Федорович
Минин Владимир Евгеньевич
Гаврилов Геннадий Серафимович

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Лабораторный практикум по дисциплине «Электронные устройства»

Редактор *Т. М. Ризевская*
Технический редактор *В. Н. Кучерова*
Корректор *М. П. Дежко*

Подписано в печать 24.11.2008 г. Формат 60 x 84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 4,18. Уч-изд. л. 4,36. Тираж 300 экз.
Зак. № . Изд. № 111.

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский государственный университет транспорта:
ЛИ № 02330/0133394 от 19.07.2004 г.
ЛП № 02330/0148780 от 30.04.2004 г.
246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34.