

З.М. СЕЛИВАНОВА, Ю.Л. МУРОМЦЕВ

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

• ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ •

Министерство образования и науки Российской Федерации

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

З.М. СЕЛИВАНОВА, Ю.Л. МУРОМЦЕВ

**ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
И ЭЛЕКТРОНИКА**

Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по образованию в области радиотехники, электроники,
биомедицинской техники и автоматизации
в качестве учебного пособия для студентов 2, 3 курсов дневного и
заочного отделений, экстерната и дистанционного обучения
специальности 210201 «Проектирование и
технология радиоэлектронных средств»



УДК 621.3(075)
ББК з21я73
С291

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор,
старший научный сотрудник первой научно-исследовательской
лаборатории Тамбовского высшего военного авиационного
инженерного училища радиоэлектроники (военного института)
В.И. Павлов

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
компьютерного и математического моделирования
Тамбовского государственного университета им. Г.Р. Державина
А.А. Арзамасцев

Селиванова, З.М.

С291 Общая электротехника и электроника : учебное посо-
бие по курсовому проектированию / З.М. Селиванова,
Ю.Л. Муромцев . – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-
та, 2009. – 120 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-0818-3.

Учебное пособие посвящено курсовому проектиро-
ванию усилительных устройств на биполярных транзи-
сторах. Представлены теоретические сведения о видах,
параметрах и характеристиках усилителей, методика
расчёта и анализа усилительных устройств переменного
тока.

Предназначено для студентов дневного и заочного
отделений, экстерната и дистанционного обучения спе-
циальности 210201 «Проектирование и технология ра-
диоэлектронных средств».

УДК 621.3(075)
ББК з21я73

ISBN 978-5-8265-0818-3 © ГОУ ВПО «Тамбовский государ-
ственный
технический университет»
(ТГТУ), 2009

Учебное издание

СЕЛИВАНОВА Зоя Михайловна,
МУРОМЦЕВ Юрий Леонидович

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие

Редактор З.Г. Чернова
Инженер по компьютерному макетированию Т.Ю. Зотова

Подписано в печать 20.05.09.
Формат 60 × 84 / 16. 6,97 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 222

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей при проектировании радиоэлектронных средств является усиление электрических сигналов по току, напряжению или мощности до требуемой величины и, следовательно, разработка теории усилителей и методика их расчёта.

Целью курсового проекта по дисциплине «Общая электротехника и электроника» является приобретение навыков самостоятельного расчёта современных усилителей на биполярных и полевых транзисторах. При расчёте усилительных устройств первоочередной задачей является проведение сравнительного анализа схмотехники усилителей аналогичного назначения. Кроме того, необходимо учитывать новейшие достижения усилительных устройств и современной элементной базы.

При проектировании усилителей рекомендуется изучить и использовать известные программные продукты, например, программу «Electronics Workbench» с целью моделирования используемых электронных компонентов, расчёта и анализа усилительных устройств.

В учебном пособии приводится информация по изучению элементной базы электроники – дискретных биполярных и полевых транзисторов, а также усилительных устройств на их основе. Рассмотрены принцип действия полупроводниковых приборов, их устройство, эквивалентные схемы, параметры и характеристики с учётом физических процессов в элементах электронной и полупроводниковой техники. Изложены принципы построения и функционирования, параметры, характеристики и оценка искажений передачи сигнала усилительных устройств. Приведена методика расчёта и анализа усилительных каскадов на биполярных и полевых транзисторах.

При проектировании усилительных устройств рекомендуется выполнить метрологический анализ усилительных устройств, оценку неопределённости в измерениях параметров усилителей, разработать и изготовить макет проектируемого усилителя, а также осуществить его регулировку и настройку.

В заключении курсового проекта следует указать основное направление совершенствования усилительных устройств – улучшение их качественных и количественных характеристик.

1. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Выбор оптимальных конструкторских и технологических решений непосредственно связан со знанием и пониманием сущности физических явлений, происходящих как в отдельных элементах усилительных устройствах, так и в целом в радиоэлектронных средствах.

При изучении и анализе предметной области – общей электротехники и электроники – студентам необходимо изучить принципы работы основных радиоэлектронных средств, уметь читать принципиальные электрические схемы радиоэлектронных средств, в частности усилительных устройств. Следует понять методику принятия конструкторско-технологических решений в зависимости от качественных и количественных характеристик проектируемых радиоэлектронных средств.

Цели и задачи курсового проектирования.

– обобщение и закрепление знаний, полученных по дисциплине «Общая электротехника и электроника»;

– расширение знаний студентов о физических процессах в полупроводниковых элементах, их параметрах и характеристиках, о физических процессах, протекающих в электронных цепях и средствах с учётом влияния паразитных параметров и отклонений параметров элементов схем;

– изучение методов расчёта и анализа усилительных устройств с использованием современных информационных технологий, программных продуктов и компьютерных технологий;

– развитие навыков практического применения теоретических знаний и принятия инженерных решений;

– освоение принципов построения усилительных устройств на основе биполярных и полевых транзисторов;

- научиться работать с научно-технической и справочной литературой при изучении и проектировании усилительных устройств в соответствии с техническим заданием на проектирование;
- применить знания, полученные в курсе инженерной и компьютерной графики для выполнения конструкторской документации в курсовом проекте и нормами единой системы конструкторской документации (ЕСКД);
- расширить кругозор студентов в процессе самостоятельного изучения научно-технической литературы, справочников по полупроводниковым приборам и электронным устройствам как по основной, так и по дополнительной рекомендуемой литературе.

2. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Задание на курсовое проектирование по дисциплине «Общая электротехника и электроника» студенты дневного отделения получают в начале 4-го семестра, а студенты заочного отделения – во время установочной сессии в конце 5-го семестра. Задание на курсовое проектирование студентам выдаёт преподаватель, который ведёт данную дисциплину.

Задание может быть индивидуальным или типовым, разработанным руководителем. В рамках типового задания студенты в соответствии со своим вариантом выполняют расчёт и анализ усилительных устройств на биполярных и полевых транзисторах. Вариант типового задания определяется двумя последними цифрами номера зачётной книжки. В рамках индивидуального задания темы курсового проектирования формируются в зависимости от научного направления кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» и задач, решаемых студентами при проектировании на филиалах кафедры на базовых предприятиях радиотехнического профиля.

Индивидуальными темами курсового проекта могут быть следующие:

- разработка усилительных устройств для информационно-измерительных систем;
- расчёт и анализ многокаскадных усилителей переменного тока;
- разработка усилительных устройств на новой современной базе;
- расчёт и анализ усилительных устройств с использованием персональных компьютеров;
- разработка функционального узла радиоэлектронного устройства (в пределах объёма материала изучаемой дисциплины).

Задание на курсовое проектирование выдаётся студентам на бланке задания на курсовой проект (работу) установленного образца, приведённом в стандарте предприятия СТП ТГТУ 07–97. В задании указываются тема проекта, исходные данные для проектирования, содержание и объём пояснительной записки, перечень чертёжно-графического материала и срок сдачи курсового проекта.

Исходные данные для проектирования включают информацию, которая является основной при проектировании электронных устройств: данные об источниках питания и сигнала, о виде и сопротивлении нагрузки, сведения о параметрах выходного сигнала. Дополнительные сведения, необходимые для проектирования устройства, студенты должны найти из других источников информации и привести их в пояснительной записке к проекту.

В задании на курсовой проект указывается перечень разделов пояснительной записки. Указываются разделы, которые отражают литературный обзор и его анализ по теме проекта, а также разделы, в которых будут отражены вопросы разработки устройства. Также в задании приводится перечень и форматы чертёжно-графических материалов проекта.

2.1. СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЁМ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовой проект включает пояснительную записку и чертёжно-графическую часть. Рекомендуемый объём пояснительной записки 25 – 30 страниц. Пояснительная записка и чертёжно-графическая часть проекта оформляются согласно стандарту предприятия СТП ТГТУ 07–97 (Проекты (работы) дипломные и курсовые. Правила оформления).

Пояснительная записка имеет следующее структурное оформление:

- титульный лист;
- ведомость проекта;

- задание на курсовой проект;
- аннотация;
- содержание;
- перечень основных условных обозначений и сокращений;
- введение;
- основные разделы в соответствии с утверждённым заданием на курсовой проект;
- заключение;
- список используемых источников;
- приложения.

Титульный лист оформляется по ГОСТ 2.301–68, образец его оформления приведен в приложении А.

Ведомость проекта содержит перечень документов, изделий, которые входят в состав курсового проекта. Ведомость проекта выполняется по ГОСТ 2.106–96.

Задание на курсовой проект является обязательным документом, без которого проект не подлежит проверке и не принимается к защите на кафедре. Задание должно быть утверждено заведующим кафедрой, подписано студентом и руководителем проекта.

В аннотации указываются тема проекта, фамилия студента и руководителя проекта, год защиты, основные проектные решения, объём пояснительной записки и чертёжно-графической части, цели и ожидаемые результаты курсового проектирования.

Содержание включает введение, наименование всех разделов и подразделов, заключение, список используемых источников, приложения с указанием номеров страниц, на которых начинается структурный элемент пояснительной записки. Каждый раздел и подраздел пояснительной записки должны иметь соответствующий заголовок.

Перечень основных условных обозначений и сокращений представляется в виде списка и формируется из используемых в пояснительной записке проекта малораспространённых сокращений и обозначений, которые повторяются не менее трёх раз.

Во *введении* необходимо сформулировать определение разрабатываемого устройства, его назначение, особенности устройства, провести анализ исходных данных, привести перечень определяемых параметров и характеристик, изложить задачи проекта и пути их решения.

Основные разделы пояснительной записки должны соответствовать утверждённому заданию на проектирование.

Примерный перечень основных разделов пояснительной записки для типового задания:

- исходные данные для расчёта усилительного устройства;
- расчёт усилителя по постоянному току;
- расчёт усилителя по переменному току;
- построение амплитудно-частотной характеристики усилителя;
- оценка искажений усилителя.

При расчёте и анализе усилительного или другого радиоэлектронного устройства необходимо в пояснительной записке привести его электрическую схему с соответствующими обозначениями элементов. Расчёт параметров схемы должен сопровождаться пояснениями и ссылками на литературные источники при использовании малоизвестных соотношений и формул. Ссылка на литературные источники даётся в квадратных скобках.

В однотипных расчётах при разных вариантах исходных данных порядок расчёта можно сократить, а итоги расчётов привести в таблице.

В *заключении* приводятся итоги курсового проектирования, выводы по всем разделам проекта, анализ полученных результатов и их соответствие заданию на проектирование. Приветствуется указание направления повышения качества разрабатываемого устройства.

Список используемых источников составляется в соответствии с ГОСТ 7.32–91. В список включается литература, которой студент пользовался при выполнении проекта и на которую в тексте пояснительной записки есть ссылки. Порядок нумерации источников осуществляется по мере их упоминания в тексте.

Приложение к пояснительной записки курсового проекта состоит из перечня элементов к электрической схеме радиоэлектронного устройства, образец выполнения которого приведён в приложении Г; спецификации (приложение Д); чертежа печатной платы макета проектируемого радиоэлектронного устройства (приложение Е); сборочного чертежа печатной платы (приложение Ж).

Чертёжно-графическая часть курсового проекта выполняется на двух или трёх листах ватмана формата А1. На листах приводятся принципиальные электрические схемы проектируемого устройства, эквивалентные схемы и частотные характеристики радиоэлектронного устройства.

При выполнении пояснительной записки и чертёжно-графической части проекта необходимо пользоваться следующими основными государственными стандартами:

ГОСТ 2.105–95 – ЕСКД. Общие требования к текстовым документам;

ГОСТ 2.301–68 – ЕСКД. Форматы;

ГОСТ 2.304–81 – ЕСКД. Шрифты чертёжные;

ГОСТ 19.401–78 – ЕСКД. Текст программы. Требования к содержанию и оформлению;

ГОСТ 2.109–73. Основные требования к чертежам;

ГОСТ 2.417–91. Платы печатные. Правила выполнения чертежей;

ГОСТ 2.702–75. Правила выполнения электрических схем;

ГОСТ 2.710–81. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах;

ГОСТ 2.730–73. Обозначения условные графические в схемах. Приборы полупроводниковые;

ГОСТ 2.759–82. Обозначения условные графические в схемах. Элементы аналоговой техники;

Р 51040–97. Платы печатные. Шаги координатной сетки;

ГОСТ 2.701–84. Перечень элементов к электрической схеме;

ГОСТ 2.701-2.759–68 (71). Обозначение элементов на электрической схеме;

ГОСТ 2.106–96. Оформление спецификаций;

ГОСТ 2.201–80. Обозначение изделия;

ГОСТ 2.104–68. Основная надпись листов чертежей и текстового документа проекта (работы).

При оформлении пояснительной записки курсового проекта с использованием вышперечисленных государственных стандартов необходимо обратить внимание на следующее:

- в тексте записки следует делать ссылки на чертёжно-графическую часть проекта;
- все разделы записки надо начинать излагать с новой страницы;
- нумерация страниц проекта сквозная, начиная с титульного листа; вторым листом является «Содержание»; в котором указываются номера страниц разделов и подразделов;
- после номеров разделов и подразделов пояснительной записки точки не ставятся;
- номер и название таблицы пишется следующим образом:
Таблица 1 – Параметры транзистора; в тексте слово «Таблица» пишется полностью;
- подрисовочная подпись выполняется следующим образом:

Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема усилителя; в тексте слово «Рисунок» пишется полностью.

После защиты курсового проекта чертёжно-графические материалы формата А1 складываются до формата А4 (в соответствии с ГОСТ 2.501–88) и вместе с пояснительной запиской складываются в папку, на которую наклеивается этикетка по образцу, приведённому в стандарте предприятия СТП ТГТУ 07–97.

3. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О БИПОЛЯРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Биполярные и полевые транзисторы находят широкое применение в качестве основной элементной базы при проектировании современных радиоэлектронных средств и электронных устройств различного назначения.

Транзистор называется биполярным, так как в формировании тока транзистора участвуют два типа носителей заряда: положительно заряженных – дырок и отрицательно заряженных – электронов.

Полевой транзистор называют униполярным, поскольку ток в транзисторе создаётся одним типом носителей заряда: или электронами, или дырками.

Транзистор изобрели американцы У. Шокли, У. Брайттейн, Дж. Бардин в 1948 году.

3.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ, УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Определение. Транзистором называется полупроводниковый прибор, состоящий из двух взаимодействующих электрических переходов, определяющих структуру транзистора.

Назначение. Биполярный транзистор служит для усиления входного сигнала в усилительных устройствах, при формировании генераторов сигналов и для реализации ключевых режимов работы электронных устройств: для коммутации сигналов в измерительных усилителях, в силовых преобразователях частоты и др.

Виды биполярных транзисторов. Структурно различают транзисторы следующих видов: *n-p-n* и *p-n-p* (рис. 3.1).

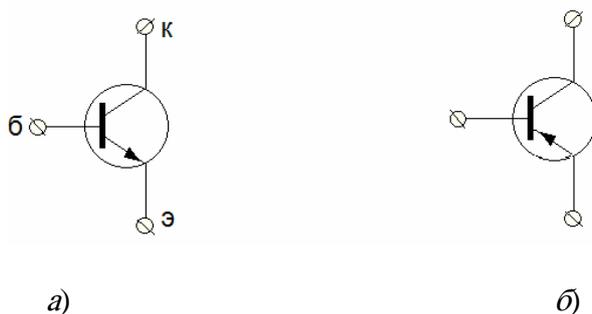


Рис. 3.1. Виды и обозначения на схемах биполярных транзисторов:

а – n-p-n; б – p-n-p

Обозначение выводов областей структуры транзистора показано на рис. 3.1, где обозначены: э – эмиттер; к – коллектор; б – база. Эмиттер предназначен для инжекции носителей заряда в базу. Инжекцией называется процесс преодоления носителями заряда потенциального барьера в *p-n* переходе. Коллектор служит для экстракции носителей заряда из базы. Экстракция – это процесс уменьшения концентрации неосновных носителей заряда у границ электрического перехода. База – это область в структуре биполярного транзистора, величина которой по ширине определяется диффузионной длиной неосновных носителей заряда.

Устройство и принцип действия биполярного транзистора. Структурная схема транзистора представлена на рис. 3.2.

Структурно транзистор состоит из трёх областей: эмиттерной, коллекторной и промежуточной – базы. Биполярный транзистор имеет два перехода: эмиттерный и коллекторный. На переходы транзистора в зависимости от его режима работы и функционального назначения подают прямое или обратное напряжения.

Принцип действия транзистора заключается в следующем. Если к эмиттерному переходу транзистора приложить прямое напряжение, а к коллекторному переходу – обратное, то электроны через эмиттерный переход инжектируют в базу. В области базы осуществляется рекомбинация электронов и дырок, а также часть электронов в результате воздействия электрического поля, создаваемого напряжением коллектор – база ($U_{кб}$), поступает в коллекторный переход, где происходит их экстракция в кол-

лктор. В результате описанных процессов формируются токи в переходах транзистора: эмиттера ($I_э$), коллектора ($I_к$) и в области базы – ток базы ($I_б$).

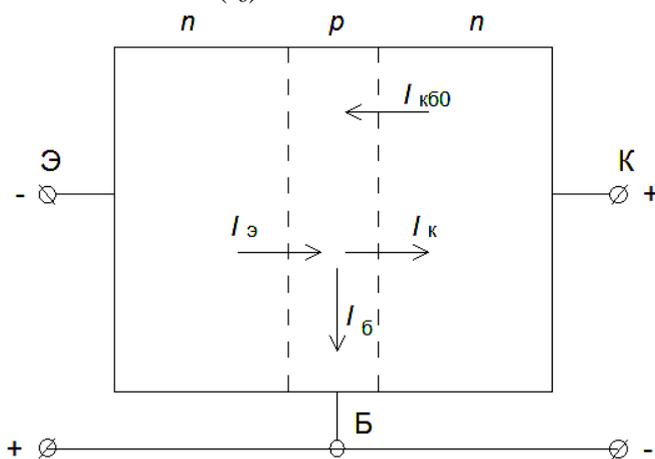


Рис. 3.2. Структурная схема биполярного транзистора

Токи в переходах транзистора можно определить по следующим соотношениям. Ток базы коллектора можно определить как разность токов эмиттера и коллектора:

$$I_б = I_э - I_к.$$

Ток коллектора можно рассчитать с помощью коэффициента передачи тока эмиттера α :

$$I_к = \alpha I_э + I_{кб0},$$

где $I_{кб0}$ – обратный ток из n -области в p -область транзистора.

3.1.1. Режимы работы и параметры биполярных транзисторов

При задании режима работы транзистора рассматривают статический режим и динамический. В статическом режиме на электроды транзистора подают напряжения от источников питания. В динамическом режиме на электроды транзистора подают напряжения от источников питания и, кроме того, на вход транзистора поступает сигнал, подлежащий усилению, а на выход транзистора подключается нагрузка.

В статистике режимы работы биполярных транзисторов зависят от полярности напряжений, подаваемых на электроды транзистора: эмиттер, базу и коллектор.

Режимы работы транзистора. В биполярных транзисторах формируют в основном четыре режима работы:

1. Режим насыщения – к эмиттерному и коллекторному переходам транзистора приложено прямое напряжение, выходной ток при этом зависит только от параметров нагрузки. Режим насыщения применяется для замыкания электрических цепей.

2. Режим отсечки – оба перехода смещены в обратном направлении, ток в выходной цепи транзистора практически равен нулю. Режим отсечки применяется для размыкания электрических цепей.

3. Активный режим – это нормальный режим работы транзистора; формируется при смещении эмиттерного перехода в прямом направлении, а коллекторного – в обратном. В активном режиме транзистор может реализовать все основные свои функции, им можно управлять. Этот режим характеризуется высоким коэффициентом передачи тока эмиттера и минимальными искажениями входного сигнала.

4. Инверсный режим – формируется при смещении эмиттерного перехода в обратном направлении, а коллекторного – в прямом. Инверсный режим характеризуется уменьшением коэффициента передачи тока эмиттера, по сравнению с активным режимом. При использовании транзисторов этот режим не находит широкого применения.

Основные параметры биполярного транзистора:

а) входное сопротивление

$$r_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}};$$

б) выходное сопротивление

$$r_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВЫХ}}};$$

в) коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}},$$

где $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$, $\Delta U_{\text{ВХ}}$ – приращения соответственно выходного и входного напряжений;

г) коэффициент усиления по току

$$K_I = \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}},$$

где $\Delta I_{\text{ВЫХ}}$, $\Delta I_{\text{ВХ}}$ – приращения соответственно выходного и входного токов транзистора;

д) коэффициент усиления по мощности

$$K_P = \frac{\Delta P_{\text{ВЫХ}}}{\Delta P_{\text{ВХ}}},$$

где $\Delta P_{\text{ВЫХ}}$, $\Delta P_{\text{ВХ}}$ – приращения соответственно мощностей на выходе и входе транзистора.

3.1.2. Схемы включения биполярных транзисторов

Как правило, транзистор включают по трем основным схемам: с общим эмиттером (ОЭ), общей базой (ОБ) и с общим коллектором (ОК) (рис. 3.3).

Общим называют электрод, который является общим при контроле потенциалов на входе и выходе транзистора.

Схема включения транзистора с общей базой изображена на рис. 3.3, где обозначены: напряжение $U_{\text{вб}}$ – входное; $U_{\text{кб}}$ – выходное.

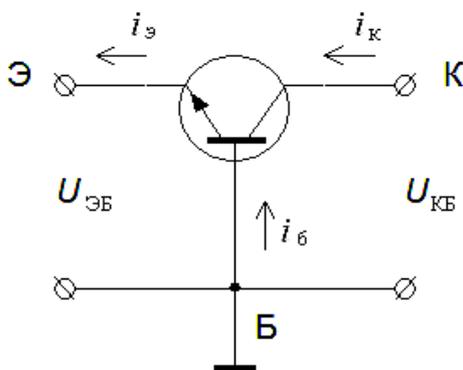


Рис. 3.3. Схема включения транзистора с общей базой

Схема включения с ОБ характеризуется низким входным сопротивлением, усиливает входной сигнал по напряжению и мощности. Усиление по току не реализует.

Схема включения транзистора с общим эмиттером представлена на рис. 3.4, где обозначены: напряжение $U_{\text{вэ}}$ – входное; $U_{\text{кэ}}$ – выходное.

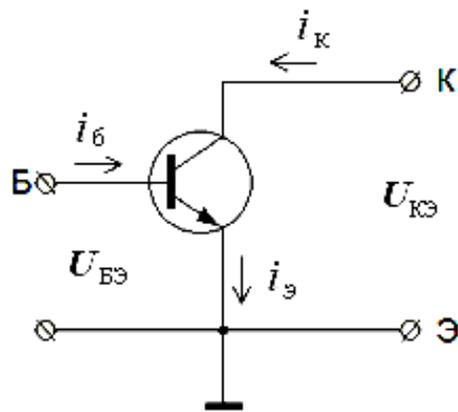


Рис. 3.4. Схема включения транзистора с общим эмиттером

В схеме включения транзистора с ОЭ осуществляется усиление входного сигнала по току, напряжению и мощности. По сравнению со схемой с ОБ, имеет большее входное сопротивление.

Схема включения транзистора с общим коллектором показана на рис. 3.5, где обозначены: напряжение $U_{бк}$ – является входным; $U_{эк}$ – выходным.

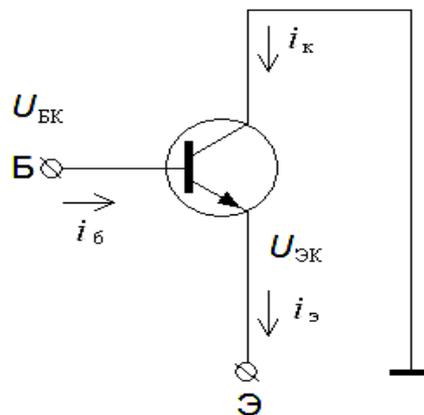


Рис. 3.5. Схема включения биполярного транзистора с общим коллектором

Схема включения с ОК называется эмиттерным повторителем. Осуществляет усиление входного сигнала по току и мощности. Не является усилителем напряжения. Имеет высокое входное сопротивление, поэтому применяется в качестве согласующего устройства между высокоомным источником сигнала и низкоомной нагрузкой, чтобы исключить влияние нагрузки на входной сигнал.

На практике наибольшее применение находит схема включения с ОЭ, так как осуществляет усиление по току, напряжению и мощности, а также схема имеет высокое входное и низкое выходное сопротивление.

3.1.3. Статистические характеристики биполярных транзисторов

Входные статические характеристики являются зависимостью между входными током и напряжением. Выходные характеристики устанавливают связь между выходными током и напряжением. Входные и выходные токи и напряжения определяются схемой включения транзистора. Входные характеристики снимаются при постоянном выходном напряжении, а выходные – при постоянном входном токе. Входные статические характеристики для схемы с ОБ представлены на рис. 3.6, а, а на рис. 3.6, б – выходные характеристики. На выходных характеристиках показаны режимы работы транзистора. В первом квадранте характеристики соответствуют нормальному режиму работы, во втором – режиму насыщения.

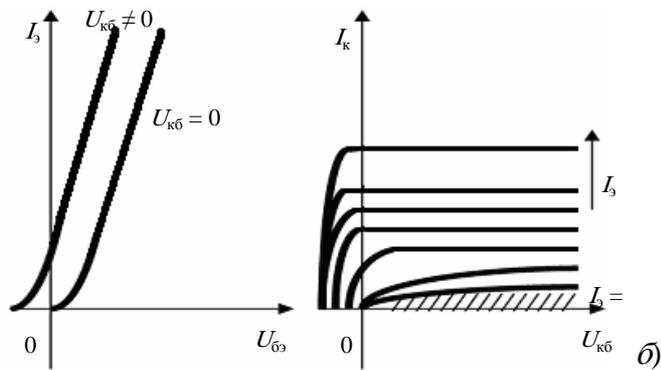


Рис. 3.6. Входные (а) и выходные (б) характеристики транзистора, включённого по схеме с ОБ

Входные характеристики схемы с ОЭ приведены на рис. 3.7, а, а на рис. 3.7, б – выходные характеристики.

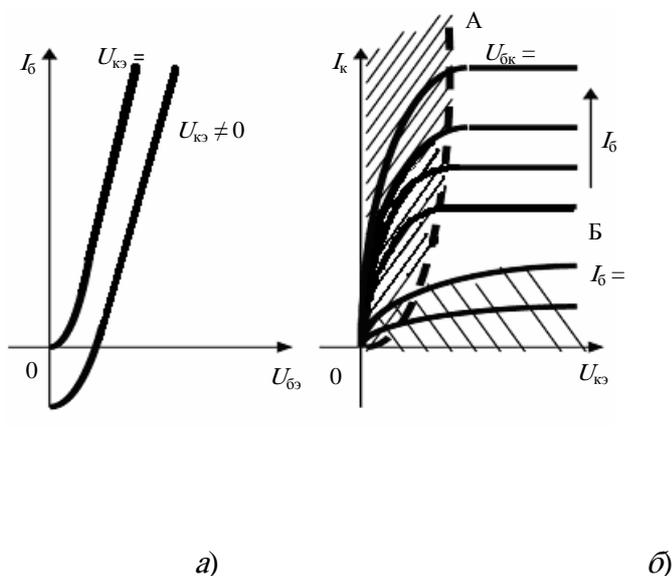


Рис. 3.7. Входные (а) и выходные (б) характеристики транзистора, включённого по схеме с ОЭ

На выходных характеристиках отмечены: режим насыщения – левее линии ОА, ниже характеристики при $I_6 = 0$ – режим отсечки. Область между линиями ОА и ОБ – активный режим.

Статические характеристики используются для расчёта параметров транзисторов и выбора соответствующего участка характеристики работы транзистора.

3.1.4. Эквивалентные схемы биполярных транзисторов

Эквивалентные схемы применяются при расчёте и анализе электрических параметров транзисторов.

В области частот для анализа переменных составляющих токов и напряжений рекомендуется использовать Т-образную эквивалентную схему, которая наиболее точно отражает структуру и физические процессы в транзисторе. Эквивалентная Т-образная схема с ОБ представлена на рис. 3.8.

По эквивалентной схеме можно определить следующие основные физические параметры транзистора.

Дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода

$$r_3 = \left. \frac{dU_{36}}{di_3} \right|_{i_k = \text{const}}$$

где U_{36} – напряжение, приложенное к эмиттерному переходу; i_3 – ток, протекающий в цепи эмиттера.

Дифференциальное сопротивление коллекторного перехода

$$r_k = \left. \frac{dU_{кб}}{di_k} \right|_{i_3 = \text{const}},$$

где $U_{кб}$ – напряжение, приложенное к коллекторному переходу; i_k – ток, протекающий в цепи коллектора.

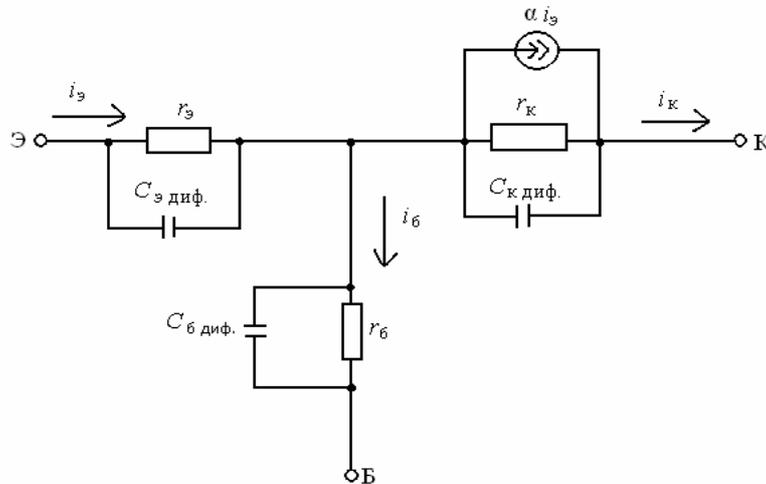


Рис. 3.8. Т-образная эквивалентная схема транзистора

Диффузионное сопротивление базы

$$r_{б\text{диф}} = \left. \frac{dU_{эб}}{di_k} \right|_{i_3 = \text{const}}.$$

Дифференциальный коэффициент передачи тока эмиттера

$$\alpha = \left. \frac{dU_k}{di_3} \right|_{i_{кб} = \text{const}}.$$

При работе транзистора в активном режиме его можно рассматривать как линейный четырёхполюсник (рис. 3.9).



Рис. 3.9. Линейный четырёхполюсник

На рисунке 3.9. параметры i_1 , U_1 считаются входными, а параметры i_2 , U_2 – выходными.

Используя в качестве переменных четырёхполюсника i и U , для описания четырёхполюсника можно применить известную систему h -параметров

$$\begin{aligned} U_1 &= h_{11} i_1 + h_{12} U_2; \\ i_2 &= h_{21} i_1 + h_{22} U_2. \end{aligned}$$

h -параметры определяются экспериментально в режимах холостого хода на входе ($i_1 = 0$) и короткого замыкания на выходе ($U_2 = 0$):

– входное сопротивление транзистора

$$h_{11} = \left. \frac{U_1}{i_1} \right|_{U_2=0};$$

– выходная проводимость транзистора

$$h_{22} = \left. \frac{i_2}{U_2} \right|_{i_1=0};$$

– коэффициент обратной связи по напряжению транзистора

$$h_{12} = \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{i_1=0};$$

– коэффициент передачи тока транзистора

$$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{U_2=0};$$

В зависимости от схемы включения транзистора (ОЭ, ОБ, ОК) будут соответствующими входные и выходные токи и напряжения. Например, для схемы с ОЭ: входной ток – i_b ; выходной ток – i_k ; входное напряжение – $U_{бэ}$; выходное напряжение – $U_{кэ}$.

Контрольные вопросы

1. Как формируются токи биполярного транзистора?
2. В каких режимах работает транзистор?
3. Как определяются параметры транзистора?
4. Изобразите схемы включения транзистора с ОЭ, ОБ и ОК.
5. Изложите принцип действия биполярного транзистора.
6. Поясните результаты анализа схем включения транзистора с ОЭ, ОБ и ОК.
7. Изобразите входные и выходные статистические характеристики биполярного транзистора.
8. С какой целью используются эквивалентные схемы транзистора?
9. Как выполняется расчёт параметров транзистора по эквивалентной схеме?
10. Поясните физический смысл h -параметров?
11. Как определяются h -параметры?

3.2. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Полевым транзистором называют полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого определяются направленным движением основных носителей заряда через проводящий канал при управлении электрическим полем.

3.2.1. Общие сведения и система обозначений полевых транзисторов

В полевых транзисторах ток создаётся основными типами носителей заряда – электронами и дырками, поэтому их называют униполярными. Процессы инжекции и диффузии, как в биполярных транзисторах, отсутствуют. Поток носителей заряда протекает через проводящий канал и управляется электрическим полем (отсюда название транзистора – полевой). Проводящий слой, по которому проходит рабочий ток, называют каналом, отсюда ещё одно название транзистора – канальный.

Полевые транзисторы разделяют на два класса: с управляющим $p-n$ -переходом и с изолированным затвором. Металлический электрод, создающий эффект поля, называется затвором (З). Два других электрода – исток (И) и сток (С). Сток и исток могут изменять свое назначение при определённой полярности напряжения. Стоком из них считается электрод, к которому движутся носители заряда. Например, если канал p -типа, то носителями заряда будут дырки, а полярность стока – отрицательная.

Достоинством полевого транзистора является высокая технологичность и большое входное сопротивление.

Обозначение полевых транзисторов на схемах показано на рис. 3.10:

- а) с управляющим $p-n$ -переходом и n -каналом;
- б) с управляющим $p-n$ -переходом и p -каналом;
- в) с изолированным затвором и индуцированным p -каналом;
- г) с изолированным затвором и индуцированным n -каналом;
- д) с изолированным затвором и со встроенным n -каналом;
- е) с изолированным затвором и со встроенным p -каналом.

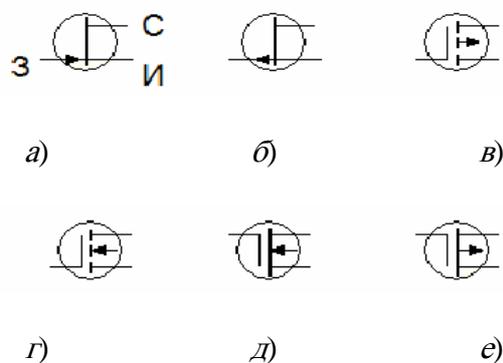


Рис. 3.10. Обозначение полевого транзистора на схемах
3.2.2. Структура и принцип действия полевых транзисторов
с управляющим $p-n$ -переходом

Рассмотрим структуру и принцип действия полевых транзисторов с управляющим $p-n$ -переходом.

Структура полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом и n -каналом показана на рис. 3.11.

Транзистор включён по схеме с общим истоком. При подаче напряжения сток-исток ($U_{си}$) через n -канал протекает ток стока (I_c). В результате приложения $U_{зи}$ изменяется область объёмного заряда (б), что приводит к изменению токопроводящего сечения проводящего канала (а).

При достижении отрицательного напряжения затвор-исток ($U_{зи}$) величины больше, чем $U_{зи}$ отсечки ($U_{зи\text{ отс}}$), т.е. $U_{зи} > U_{зи\text{ отс}}$, увеличивается сечение проводящего канала, по которому протекает ток стока (I_c) от стока к истоку. Увеличение отрицательного напряжения на обратно смещённом $p-n$ -переходе $U_{зи}$ приводит к сужению проводящего канала и уменьшению I_c . При достижении отрицательного напряжения

$U_{зи} = U_{зи\text{ отс}}$ ток стока практически равен нулю.

В полевом транзисторе с p -каналом управляющее напряжение $U_{зи}$ должно быть положительным.

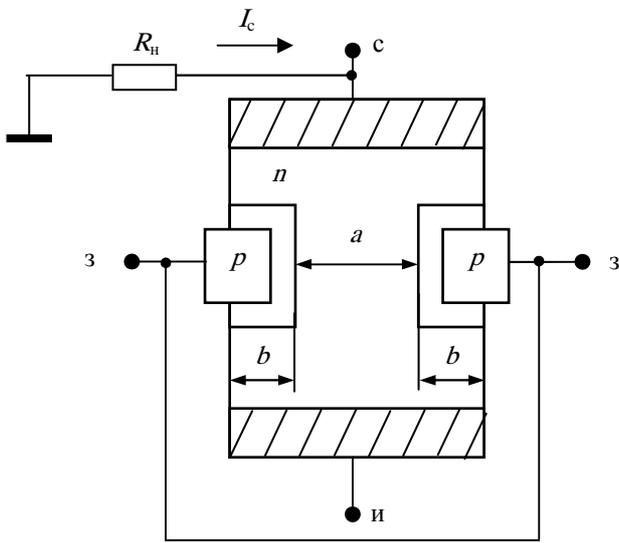


Рис. 3.11. Структура полевого транзистора с управляющим *p-n* переходом

Выходные вольтамперные характеристики полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом показаны на рис. 3.12. Вольтамперные характеристики полевого транзистора являются выходными статистическими характеристиками при постоянном напряжении на затворе $U_{зи}$. Особенностью характеристик является наличие трёх областей: линейной, насыщения и электрического пробоя.

Передаточные вольтамперные статические характеристики изображены на рис. 3.13, представляют собой зависимость тока стока I_c от напряжения $U_{зи}$ при постоянном напряжении $U_{си}$.

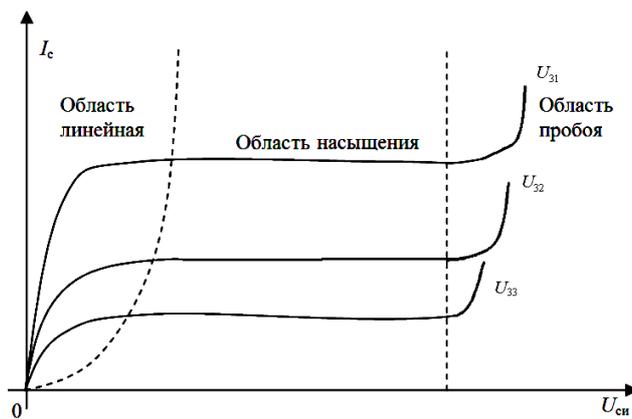


Рис. 3.12. Выходные вольтамперные характеристики полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом

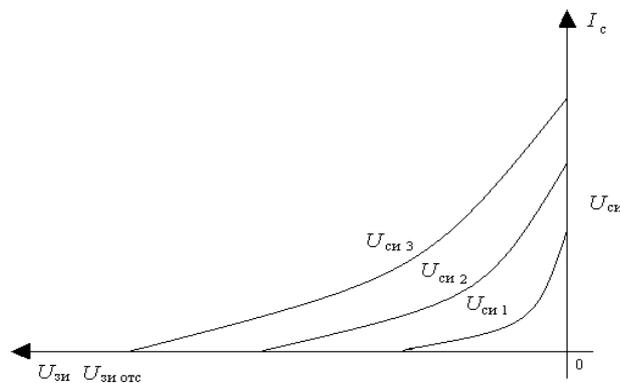


Рис. 3.13. Передаточные вольтамперные характеристики полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом

Основные параметры. Крутизна характеристики определяется через приращения тока стока I_c и напряжения затвор – исток $U_{зи}$ при постоянном напряжении сток – исток $U_{си}$

$$S = \left. \frac{\Delta I_c}{U_{зи}} \right|_{U_{си} = \text{const}}$$

Выходное дифференциальное сопротивление рассчитывается по формуле

$$r_c = \left. \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \right|_{U_{си} = \text{const}}$$

Сопротивление открытого канала равно

$$R_0 = \frac{U_{си}}{I_c}$$

Коэффициент усиления

$$K = \left. \frac{dU_{си}}{dU_{зи}} \right|_{I_c = \text{const}}$$

Параметры полевого транзистора с управляющим p - n -переходом можно определить по вольтамперным выходным и передаточным статическим характеристикам транзистора.

3.2.3. Структура и принцип действия полевых транзисторов с изолированным затвором

Рассмотрим структуры и принцип действия полевых транзисторов с изолированным затвором и со встроенным каналом (структуры МОП – металл-окисел-полупроводник).

Полевой транзистор с изолированным затвором и со встроенным каналом. Структура транзистора показана на рис. 3.14.

Полевой транзистор с изолированным затвором работает в двух режимах: обеднения и обогащения. В режиме обеднения для канала n -типа на затвор подаётся отрицательное напряжение, которое отталкивает электроны во встроенном канале. При этом создаются обеднённые слои между каналом и изолирующим слоем окисла, ток стока уменьшается. В режиме обогащения для канала p -типа на затвор подаётся положительное напряжение. В этом случае ток стока увеличивается за счёт поступления электронов в проводящий канал из области подложки.

Полевой транзистор с индуцированным каналом. Структура полевого транзистора с индуцированным каналом представлена на рис. 3.15.

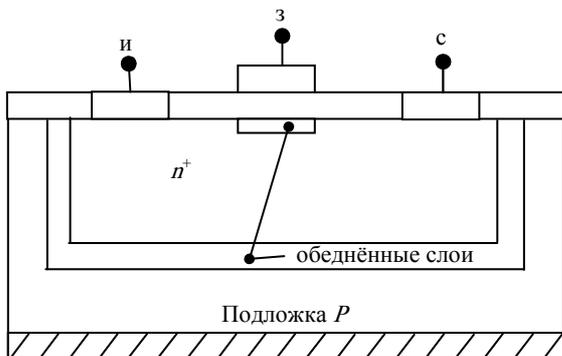


Рис. 3.14. Структура полевого транзистора с изолированным затвором и со встроенным каналом

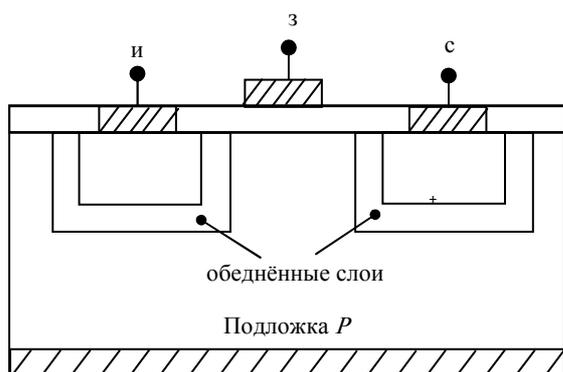


Рис. 3.15. Структура полевого транзистора с индуцированным каналом

Области n^+ вокруг истока и стока при напряжении на затворе, равном нулю, представляют собой два встречно включённых диода, и ток стока при этом незначителен. При подаче положительного напряжения на затвор к изолирующей прокладке затвора притягиваются электроны из p -подложки и на затворе транзистора индуцируется проводящий канал. В результате увеличивается ток стока. Полевой транзистор с индуцированным каналом работает только в режиме обогащения.

Параметры и характеристики полевого транзистора с изолированным каналом соответствуют параметрам и характеристикам полевого транзистора с управляющим p - n -переходом.

3.3. КЛАССИФИКАЦИЯ И МАРКИРОВКА БИПОЛЯРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Классификация транзисторов осуществляется в основном по функциональному назначению, по диапазону рабочих частот и по мощности.

По функциональному назначению биполярные и полевые транзисторы разделяются на три класса: усилительные, переключательные и генераторные. Транзисторы, отнесённые к соответствующему классу, имеют характерные для рассматриваемого класса параметры и характеристики.

По диапазону частот транзисторы разделяются следующим образом в зависимости от граничной частоты:

- низкочастотные (до 30 МГц);
- высокочастотные (до 300 МГц);
- сверхвысокочастотные (более 300 МГц).

Классификация транзисторов по мощности следующая:

- малой мощности (до 0,3 Вт);
- средней мощности (до 1,5 Вт);
- большой мощности (свыше 1,5 Вт).

Маркировка транзисторов выполняется буквенно-цифровая. Маркировку рассмотрим на примере следующего обозначения транзистора КТ 315 А:

К	Т	3	1	5	А
---	---	---	---	---	---

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

В таблице позиции 1 – 5 означают следующее:

1 – материал, из которого изготовлен транзистор (1 или Г, германий; 2 или К – кремний, 3 или А – арсенид галлия);

2 – буква определяет тип транзистора (Т – биполярный, П – полевой);

3 – цифра обозначает мощность и частоту транзистора;

по мощности:

– 1, 2, 3 – малой мощности;

– 4, 5, 6 – средней мощности;

– 7, 8, 9 – большой мощности;

по диапазону рабочих частот:

– 1, 2, 3 – до 30 МГц (малой мощности);

– 4, 5, 6 – до 30 МГц (средней мощности);

– 7, 8, 9 – до 30 МГц (большой мощности).

4 – две цифры определяют номер разработки типа транзистора по технологии изготовления;

5 – буква означает параметрическую группу транзисторов.

Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия полевых транзисторов?
2. Какие виды полевых транзисторов Вы знаете?
3. В чём отличие структур полевых транзисторов со встроенным и индуцированным каналами?
4. Какие параметры полевых транзисторов Вы знаете?
5. В чём отличие принципов действия полевого транзистора и биполярного?
6. Каковы величины входного и выходного сопротивлений полевого транзистора?
7. Поясните классификацию и систему обозначений транзисторов.
8. Какие режимы работы полевого транзистора Вам известны?
9. Поясните статические характеристики полевого транзистора.
10. В чём преимущество полевых транзисторов по сравнению с биполярными?

4. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ТРАНЗИСТОРАХ

Усилительные устройства предназначены для усиления входного сигнала по току, напряжению и мощности в зависимости от схем включения биполярного или полевого транзисторов.

Электронные усилители применяются в измерительной аппаратуре, радиоэлектронных средствах, радиопередающих и радиоприёмных устройствах, информационно-измерительных и телекоммуникационных системах, а также в качестве отдельно функционирующего блока.

4.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ, СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И КЛАССИФИКАЦИЯ УСИЛИТЕЛЕЙ

Обозначение усилителя на электрических схемах и структурная схема показаны на рис. 4.1, где \dot{U}_1 – входное напряжение; \dot{U}_2 – выходное напряжение переменного сигнала; E_T – генератор входного сигнала; R_T – внутреннее сопротивление генератора.

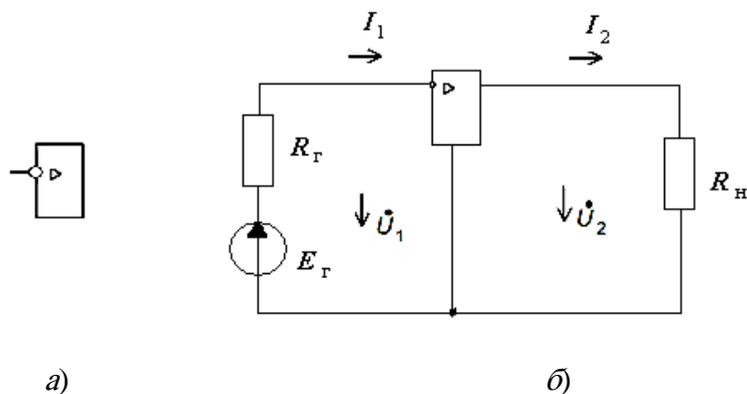


Рис. 4.1. Обозначение усилителя на электрических схемах (а) и структурная схема (б)

Структурно усилитель может состоять из одного усилительного каскада на базе усилительного элемента или же из нескольких каскадов – многокаскадный усилитель.

Функциональные возможности и характеристики усилителя зависят от обратных связей. Обратная связь осуществляется при подаче сигнала с выхода усилителя на его вход. Обратная связь влияет на входное и выходное сопротивления, коэффициент усиления, полосу пропускания, искажения усилителя. Различают следующие виды обратных связей: последовательная по току и напряжению, параллельная по току и напряжению. Каждая из этих видов связей может быть как положительной, так и отрицательной. При действии положительной обратной связи величина напряжения сигнала обратной связи суммируется с напряжением входного сигнала. При действии отрицательной обратной связи напряжение сигнала обратной связи вычитается из напряжения входного сигнала.

Классификация усилителей. В зависимости от вида усиливаемой величины различают усилители тока, напряжения и мощности, по типу сигнала-импульсных и гармонических сигналов. Существуют усилители переменного и постоянного тока. Усилители, работающие в диапазоне частот до сотен кГц, относятся к усилителям низкой частоты (УНЧ), а работающие в частотном диапазоне до сотен МГц – относятся к усилителям высокой частоты (УВЧ). Кроме того, бывают широкополосные и избирательные усилители.

В широкополосном усилителе обеспечивается одинаковое усиление в широком диапазоне частот. Избирательный усилитель усиливает входной сигнал в заданной полосе. По виду нагрузки усилители бывают с активной, индуктивной, ёмкостной и резонансной нагрузками.

Усилительные каскады могут применяться в качестве усилителя промежуточной частоты в устройствах радиосвязи, предварительного усилителя для усиления сигнала до уровня, обеспечивающего нормальную работу оконечного усилителя, в качестве оконечного усилителя мощности в нагрузке, резонансного усилителя, видеоусилителя, применяющегося в телевизионных системах.

Усилители как отдельные блоки используются в качестве усилителей звуковой частоты, измерительных усилителей и антенных усилителей в радиопередающих и радиоприёмных устройствах.

4.2. ПАРАМЕТРЫ, ХАРАКТЕРИСТИКИ И ИСКАЖЕНИЯ В УСИЛИТЕЛЯХ

Параметры усилителя.

1. Усилительные параметры:

а) коэффициент усиления по напряжению равен

$$K_U = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1};$$

б) коэффициент усиления по току

$$K_I = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1};$$

в) коэффициент усиления по мощности

$$K_P = \frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}.$$

В приведённых формулах для расчёта усилительных параметров индексы «1» параметров соответствуют входным величинам, а индексы «2» – выходным величинам.

2. Входное сопротивление – определяется для согласования усилителя с источником входного сигнала и рассчитывается по формуле

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_1}{I_1}, R_{\text{н}} = \text{const},$$

где $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки.

3. Выходное сопротивление – определяется для согласования усилителя с нагрузкой, рассчитывается следующим образом:

$$R_{\text{вых}} = \frac{U_2}{I_2}.$$

4. Выходная мощность усилителя (мощность в нагрузке)

$$P_{\text{вых}} = \frac{I_{\text{н}}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{2}} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{2}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{2R_{\text{н}}}.$$

Характеристики усилителя.

1. Важнейшей характеристикой усилителя является его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). АЧХ – это зависимость коэффициента усиления от частоты усиливаемого сигнала (рис. 4.2). По АЧХ определяют полосу пропускания усилителя – диапазон рабочих частот, в пределах которого коэффициент усиления (K_U) не снижается ниже $1/\sqrt{2}$ от максимального значения. Полоса пропускания $\Delta\omega$ определяется, как следует из АЧХ на рис. 4.2, следующим образом:

$$\Delta\omega = \omega_{\text{в}} - \omega_{\text{н}},$$

где $\omega_{\text{в}}$ – верхняя частота полосы пропускания; $\omega_{\text{н}}$ – нижняя частота.

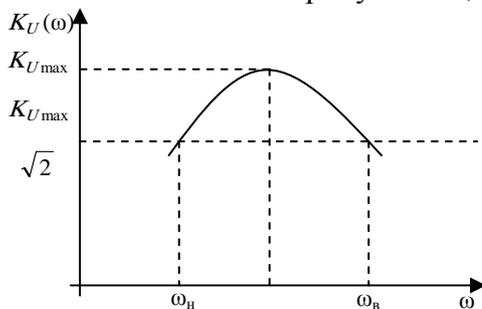


Рис. 4.2. Амплитудно-частотная характеристика усилителя

На рисунке 4.2 $K_{U\text{max}}$ – максимальное значение коэффициента усиления по напряжению; $K_U(\omega)$ – коэффициент усиления на частоте ω .

2. Искажения сигналов в усилителе. Существуют два вида искажений: статические (нелинейные) и динамические (линейные), к которым относятся частотные и фазовые.

Изменение формы выходного напряжения, обусловленное дополнительными гармоническими составляющими в спектре выходного сигнала, относится к нелинейным искажениям. Нелинейные искажения оцениваются коэффициентом гармоник K_g , который характеризует отличие формы выходного сигнала от гармонической и представляет собой отношение среднеквадратичного напряжения суммы всех гармоник выходного сигнала усилителя, кроме первой, к среднеквадратичному напряжению первой гармоники:

$$K_g = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2}}{U_1} \cdot 100 \% ,$$

где U_i – амплитуда напряжения i -й гармоники на выходе усилителя.

К частотным искажениям относится изменение формы выходного напряжения $U_{\text{вых}}$, вызванное изменением относительных значений амплитуд отдельных гармонических составляющих спектра выходного сигнала по сравнению со спектром входного сигнала. Частотные искажения характеризуются коэффициентом частотных искажений M , который определяется по формуле

$$M = \frac{K_0}{K} ,$$

где K_0 – коэффициент усиления на средней частоте; K – коэффициент усиления на рассматриваемой частоте.

Фазовые искажения характеризуются изменением формы $U_{\text{вых}}$, которое обусловлено неодинаковым сдвигом во времени отдельных гармонических составляющих в спектре выходного сигнала.

Чувствительность усилителя – величина сигнала, определяющегося минимальными значениями тока, напряжения или мощности на входе усилителя, которые определяют заданные ток, напряжение или мощность в нагрузке.

4.3. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ КАСКАДЫ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ ПРИ ПОСТОЯННОМ И ПЕРЕМЕННОМ ТОКАХ

Усилительные каскады, выполненные на биполярных транзисторах, в зависимости от схемы включения транзистора бывают трёх видов: с общим эмиттером, базой и коллектором. Усилительные каскады на полевых транзисторах различают с общим истоком, стоком и затвором. Основные особенности усилительных каскадов: каскад с общим эмиттером является фазоинверсным (сдвигает фазу сигнала на 180°); каскады с общим коллектором и стоком применяются в качестве согласующих устройств между высокоомным источником сигнала и нагрузкой.

В качестве примеров рассмотрим схемы усилителей на биполярном и полевом транзисторах.

Схема усилителя на биполярном транзисторе, включённом по схеме с общим эмиттером при постоянном токе, приведена на рис. 4.3.

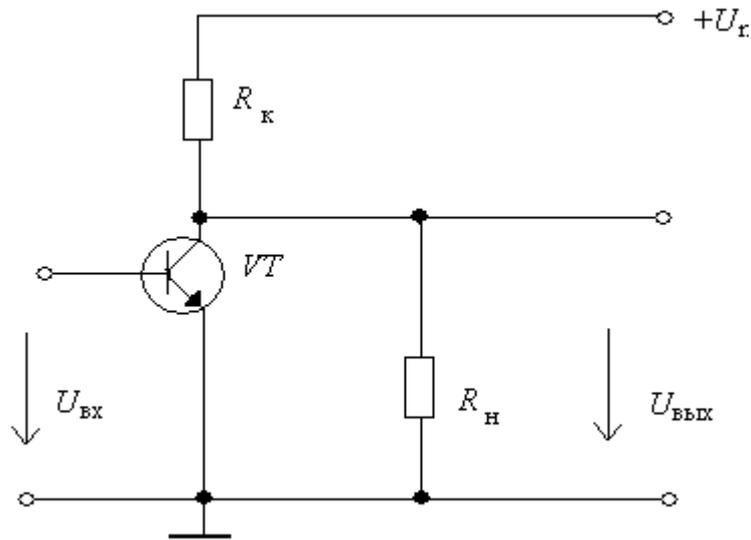


Рис. 4.3. Схема усилительного каскада с ОЭ при постоянном токе

Усилительный каскад с ОЭ, приведённый на рис. 4.3, фазоинверсный, фазы выходного и входного напряжения отличаются на 180° . Резистор R_k является нагрузочным в цепи коллектора транзистора VT. Выходное напряжение снимается с нагрузки, подключённой к коллектору транзистора VT.

Принципиальная электрическая схема усилителя с ОЭ при переменном токе представлена на рис. 4.4.

На схеме усилителя резистор R_k является нагрузочным в цепи коллектора по постоянному току и определяет его усилительные свойства. Конденсаторы C_{p1} и C_{p2} – разделительные, необходимы для того, чтобы не пропускать в нагрузку постоянную составляющую сигнала и чтобы источник входного сигнала и нагрузка не изменяли режим работы транзистора по постоянному току. Резисторы R_1 и R_2 составляют делитель напряжения, задающим напряжение смещения, которое определяет положение рабочей точки. Через резистор R_3 формируется последовательная отрицательная обратная связь по току, служащая для стабилизации рабочей точки. Конденсатор C_3 является шунтирующим в режиме переменного тока, обеспечивающим стабильное положение рабочей точки, заданное в режиме постоянного тока.

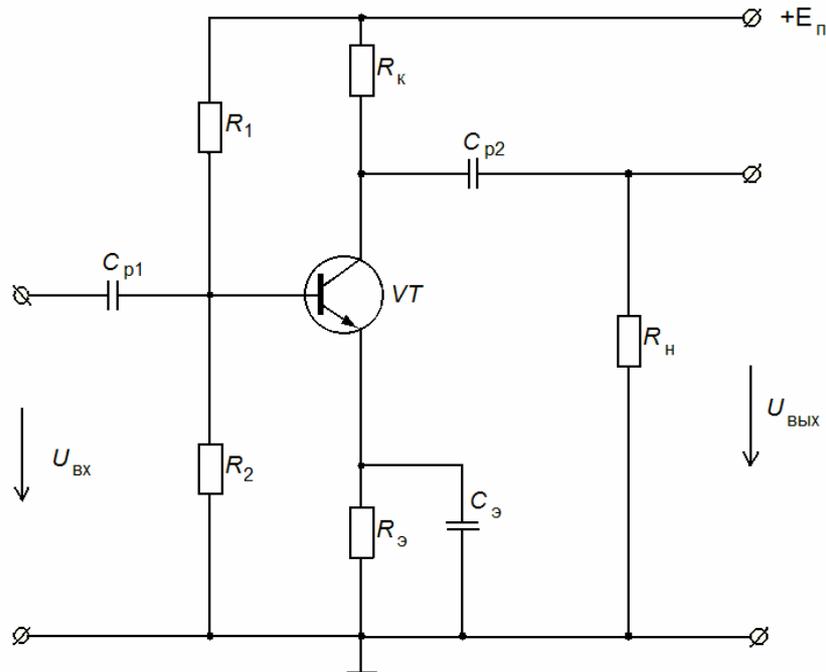


Рис. 4.4. Принципиальная электрическая схема усилителя с ОЭ

Схема усилительного каскада с ОЭ усиливает входной сигнал по току, напряжению и мощности. Имеет приблизительно равные входное и выходное сопротивления, что обеспечивает удобство согласования по сопротивлению при применении в многокаскадных усилителях.

4.3.1. Рабочая точка усилителя и методы её стабилизации

Рабочая точка усилителя. Рабочей точкой считаются ток и напряжение на выходе транзистора при отсутствии входного сигнала.

Рабочая точка определяется по статическим входной и выходной характеристикам транзистора. Построение рабочей точки показано на рис. 4.5. на примере статистических характеристик транзистора с ОЭ.

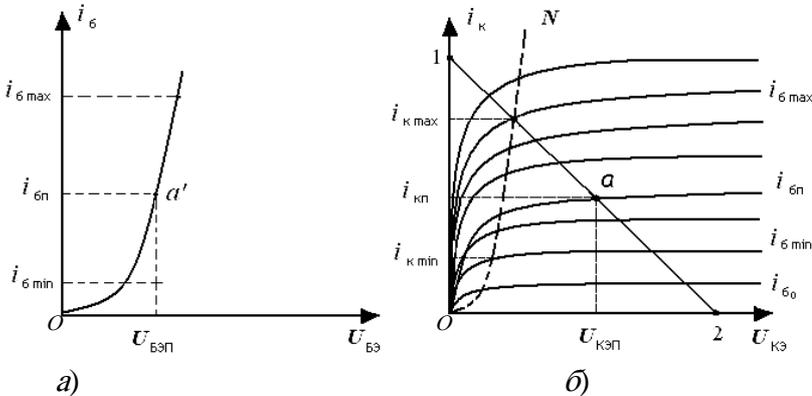


Рис. 4.5. Статистические входная (а) и выходная (б) характеристики транзистора с ОЭ

Для определения положения рабочей точки на входной характеристике $i_b = f(U_{бэ})$ начало линейного участка характеристики обозначим $i_{b \min}$. Этому значению на выходной характеристике соответствует $i_{k \min}$. Построим на выходных характеристиках нагрузочную прямую в режимах короткого замыкания и холостого хода. В режиме короткого замыкания ($U_{бэ} = 0$) $i_k = \frac{U_{п}}{R_k}$, где $U_{п}$ – напряжение питания. Этому значению на рис. 4.5 соответствует точка 1. В режиме холостого хода ($i_k = 0$) $U_{кэ} = U_{п}$. На рис. 4.5 это значение показано точкой 2. Через точки 1 и 2 проводим нагрузочную прямую. Точка пересечения нагрузочной прямой и линии ON , показывающей границу режимов работы транзистора насыщения и активного, соответствует $i_{k \max}$ и $i_{b \max}$. Ток коллектора покоя $i_{kп}$ определяется следующим образом:

$$i_{kп} = \frac{U_{k \max} - U_{k \min}}{2}.$$

На нагрузочной прямой этому значению тока соответствует рабочая точка a . Для рабочей точки показано напряжение покоя $U_{кэп}$. На входную характеристику перенесём с рис. 4.5, б значения $i_{bп}$, $i_{b \max}$; обозначим рабочую точку a' и напряжение смещения $U_{бэп}$, которое определяет режим работы транзистора. Положение рабочей точки a в середине нагрузочной прямой соответствует классу усиления (режиму работы усилителя) А.

Стабилизация рабочей точки усилителя. Воздействие внешних дестабилизирующих факторов влияет на ток покоя транзистора в усилительном каскаде и изменяет режим работы усилителя. Основными дестабилизирующими факторами являются: нестабильность напряжения питания, изменения температуры окружающей среды и сопротивления нагрузки.

Для стабилизации рабочей точки усилителя применяются три основных метода: термокомпенсации, термостабилизации и параметрической стабилизации.

В методе термокомпенсации в усилительном каскаде, например, с ОЭ в цепь база-эмиттер ставится компенсационный элемент – диод (VD) или термистор (рис. 4.6).

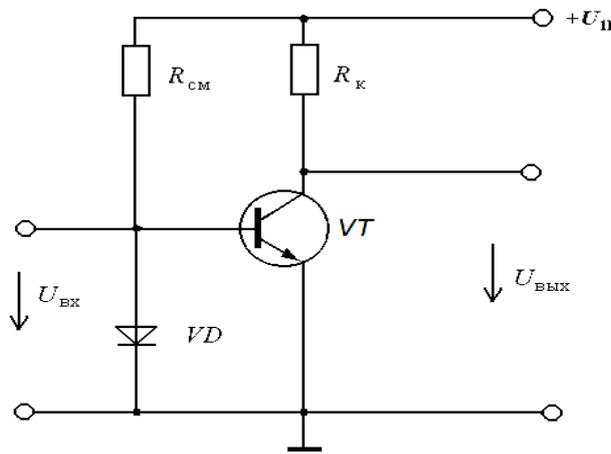


Рис. 4.6. Схема усилительного каскада с ОЭ, реализующая метод термокомпенсации

Принцип термокомпенсации заключается в том, что при воздействии температуры окружающей среды температурные изменения напряжения на диоде VD компенсируют температурные изменения напряжения перехода база-эмиттер. В результате выходной ток транзистора остаётся стабильным. Резистор R_{CM} вместе с диодом VD образуют делитель напряжения, который служит для задания рабочей точки транзистора.

Метод термостабилизации усилителя по схеме с ОЭ основан на применении отрицательной обратной связи при воздействии на усилитель температуры окружающей среды. К методам термостабилизации относятся методы коллекторной и эмиттерной стабилизации. Например, реализация метода эмиттерной стабилизации показана в схеме на рис. 4.7, на которой введены следующие обозначения: E_c – источник входного сигнала; R_{BH} – внутреннее сопротивление источника входного сигнала; $R_э$ – сопротивление эмиттерного перехода; $C_э$ – шунтирующий конденсатор большой ёмкости.

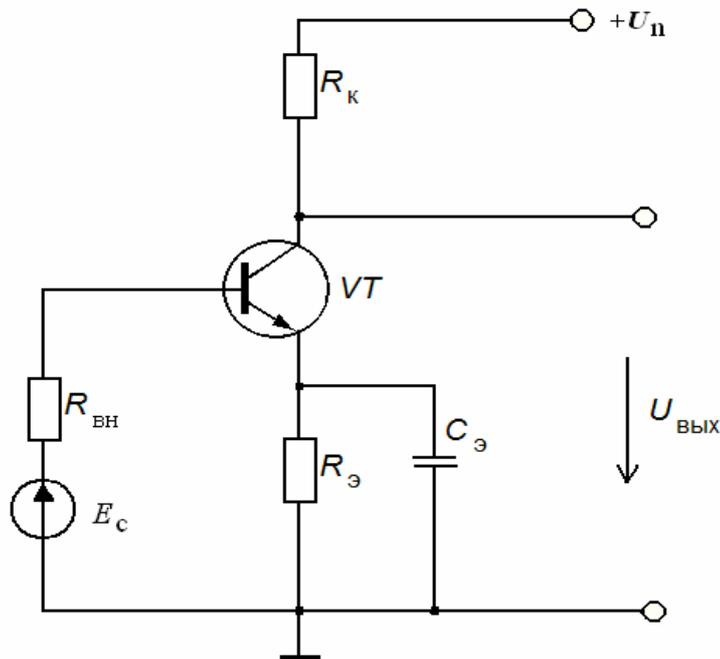


Рис.4.7. Применение метода эмиттерной стабилизации в усилительном каскаде с ОЭ

Сигнал отрицательной обратной связи поступает на базу транзистора, уменьшая при этом коэффициент усиления, что позволяет стабилизировать параметры каскада, расширить частотную полосу пропускания, увеличить входное сопротивление, уменьшить искажения усилителя.

В методе параметрической стабилизации в цепь база-эмиттер вводится дополнительный транзистор, осуществляющий, например, коллекторную стабилизацию при действии параллельной отрицательной обратной связи по напряжению. При этом стабилизируется ток коллектора покоя транзистора, на базе которого выполнен усилитель.

4.4. УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД НА ПОЛЕВОМ ТРАНЗИСТОРЕ

Схема усилителя на полевом транзисторе, включенном по схеме с общим стоком (ОС), приведена на рис. 4.8, на котором обозначено: R_r – внутреннее сопротивление источника входного сигнала (генератора); R_3 – сопротивление затвора, которое формирует и стабилизирует входное сопротивление каскада; $R_{и}$ – сопротивление истока, которое задаёт начальное смещение рабочей точки и её стабилизацию в результате действия через $R_{и}$ последовательной отрицательной обратной связи по току.

Схема усилителя с ОС имеет большое входное и низкое выходное сопротивления, поэтому применяется в качестве согласующего устройства между высокоомным источником сигнала и низкоомной нагрузкой, чтобы исключить влияние нагрузки на входной сигнал.

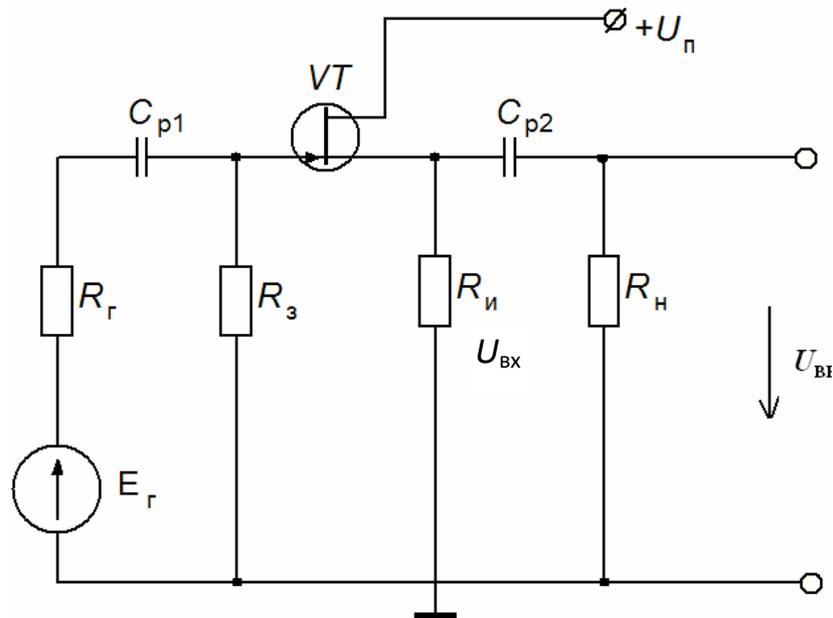


Рис. 4.8. Принципиальная электрическая схема усилителя на полевом транзисторе с ОС

Усилитель обеспечивает усиление входного сигнала по току и мощности, не является усилителем напряжения, коэффициент усиления по напряжению меньше единицы, а по току – $10^2 \dots 10^3$. Назначение элементов в схеме с ОС аналогичное схеме усилителя с ОЭ на биполярном транзисторе. Усилитель с ОС не инвертирует фазу усиливаемого сигнала.

Контрольные вопросы

1. Какие виды усилителей в зависимости от диапазона рабочей частоты Вы знаете?
2. Как подразделяются усилители по виду нагрузки?
3. Какие параметры усилителей Вы знаете?
4. Как определить полосу пропускания усилителя по амплитудно-частотной характеристике?
5. Какими факторами определяются линейные и нелинейные искажения в усилителе?
6. Какую роль играет разделительный конденсатор в усилительных каскадах переменного тока?
7. Какие обратные связи в усилителях Вы знаете?
8. Как влияют обратные связи на параметры и характеристики усилителя?
9. Как определить параметры (I , U) рабочей точки усилителя?
10. Как сформировать требуемый режим работы усилителя?
11. Какие основные схемотехнические методы стабилизации рабочей точки Вы знаете?
12. Изобразите электрические принципиальные схемы усилительных каскадов на биполярном и полевом транзисторах, поясните назначение элементов на схемах и обратных связей.
13. Чем определяются входное и выходное сопротивления истокового повторителя?
14. Почему коэффициент передачи по напряжению истокового повторителя меньше единицы?
15. В чём преимущество истокового повторителя, по сравнению со схемой с общим истоком?

5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЁТ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ НА КОМПЬЮТЕРЕ

Проектирование современных радиоэлектронных средств требует обеспечения высокой точности и качества изготовления. Поэтому при разработке радиоэлектронных средств применяются компьютерные методы разработки ввиду сложности и объёмности выполняемых работ.

Приложение Electronics Workbench представляет собой средство программной разработки и имитации электрических цепей. Программный комплекс может применяться как на предприятиях радиотехнического профиля, так и в высших учебных заведениях, занимающихся изучением и разработкой радиоэлектронных устройств.

Программа Electronics Workbench может производить большое количество анализов радиоэлектронных устройств, занимающих достаточно много времени при стандартных методах разработки, а также включает в себя большое количество моделей радиоэлектронных устройств, наиболее известных производителей.

Программный комплекс Electronics Workbench прост в обращении и не требует глубоких знаний в компьютерной технике. Интерфейс программы можно освоить за несколько часов работы.

5.1. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ И РАСЧЁТУ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА КОМПЬЮТЕРЕ

В настоящее время компьютерное моделирование становится необходимым при проектировании усилительных устройств, их расчёте и анализе. Целью компьютерного моделирования является определение оптимального варианта схмотехнического решения при проектировании усилителя в соответствии с техническим заданием. В качестве критерия оптимальности выбираются стабильность работы, точность выходных параметров и характеристик.

Применение компьютерного моделирования связано с необходимостью анализа работы усилительных устройств в условиях некоторой неопределённости, которая обусловлена следующими основными причинами:

- а) воздействие на усилитель внешних и внутренних дестабилизирующих факторов:
 - нестабильность напряжения питания;
 - изменение температуры окружающей среды;
 - зависимость параметров усилителя от частоты;
 - изменение влажности окружающей среды;
 - изменение сопротивления нагрузки;
 - неточность используемой электрической схемы;
 - старение используемой элементной базы;
 - воздействие электромагнитных полей;
 - несовершенство технологии изготовления компонентов усилителя;
 - влияние на параметры усилителя паразитных индуктивностей, ёмкостей и сопротивлений проводников печатной платы;
 - скрытые дефекты применяемых компонентов: резисторов, конденсаторов, транзисторов;
- б) неточность исходной информации для расчёта усилителя:
 - интервальное значение параметров элементной базы (коэффициентов передачи тока транзисторов, параметров используемой элементной базы в зависимости от условий эксплуатации, режимов измерений, предельных эксплуатационных режимов и условий работы усилительных устройств);
 - сохранение работоспособности усилительных устройств на этапах жизненного цикла независимо от условий эксплуатации и изменения внешних и внутренних факторов.

Компьютерное моделирование усилителей позволит осуществить имитационные эксперименты по исследованию влияния воздействующих дестабилизирующих факторов на выходные параметры и характеристики усилительных устройств, найти оптимальные значения параметров усилителей и получить аналитические зависимости между исследуемыми параметрами и характеристиками и дестабилизирующими факторами в заданном диапазоне их возможного изменения.

Подготовка студентов к проведению компьютерного моделирования, анализа и расчёта усилительных устройств заключается в изучении теоретического материала по проектированию усилительных устройств, принципов действия базовых усилительных элементов – транзисторов, усилителей и происходящих в них физических процессов, а также в изучении методов расчёта и анализа усилительных уст-

ройств. Студенты должны изучить поставленную задачу и знать, какие цели и результаты могут быть достигнуты при её решении.

При подготовке к моделированию на компьютере студенты должны выполнить следующее:

- изучить принципиальную электрическую схему усилительного устройства, назначение и принцип действия элементов в схеме, назначение обратных связей;
- знать предполагаемые величины параметров элементов и вид выходных характеристик;
- обосновать схему замещения усилительного устройства для анализа процессов;
- подготовить исходные данные для расчётов в соответствии со своим вариантом или индивидуальным заданием преподавателя, справочные данные параметров и характеристик, используемых в усилителе элементов и привести их к единой системе единиц СИ;
- изучить используемую в данном курсовом проекте для моделирования, расчёта и анализа усилительных устройств на компьютере программу Electronics Workbench.

Компьютерное моделирование предполагает использование математических моделей вместо реальных объектов усилителей – полупроводниковых приборов, резисторов, конденсаторов, источников входных сигналов. При математическом моделировании усилительного устройства в компьютер вводится информация о компонентах усилителя и с помощью графического редактора используемой программы Electronics Workbench на мониторе компьютера формируется исследуемая электрическая принципиальная схема усилительного устройства. При математическом моделировании усилителя компоненты электрической схемы с помощью программы заменяются соответствующими эквивалентными схемами и математическими выражениями.

Программа Electronics Workbench позволяет моделировать все режимы и выполнять анализ работы усилителя: по постоянному и переменному току, динамический режим при наличии переходных процессов в схеме, при воздействии дестабилизирующих факторов, исследовать шумовые свойства усилителя. В режиме по переменному току при воздействии на вход усилителя переменного сигнала определяются и выполняется анализ амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик.

Анализ работы электрической схемы усилительного устройства проводится при варьировании значениями параметров элементов схемы в допустимых пределах их изменения для рассматриваемой схемы. Параметрическая оптимизация параметров элементов схемы при поиске оптимального схемотехнического варианта выполняется в соответствии с заданными критериями – стабильность и точность работы усилительного устройства.

Компьютерное моделирование позволяет выполнить не только анализ и расчёт электрической схемы усилителя, но и учитывать влияние паразитных индуктивностей, ёмкостей и сопротивлений проводников печатной платы с последующей коррекцией схемы усилителя и технологического процесса изготовления печатной платы. Рекомендуемый программный комплекс Electronics Workbench содержит программу разработки печатных плат.

5.2. ОПИСАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ ELECTRONICS WORKBENCH

Интерфейс программного комплекса Electronics Workbench. Интерфейс пользователя состоит из полосы меню, панели инструментов и рабочей области (рис. 5.1).

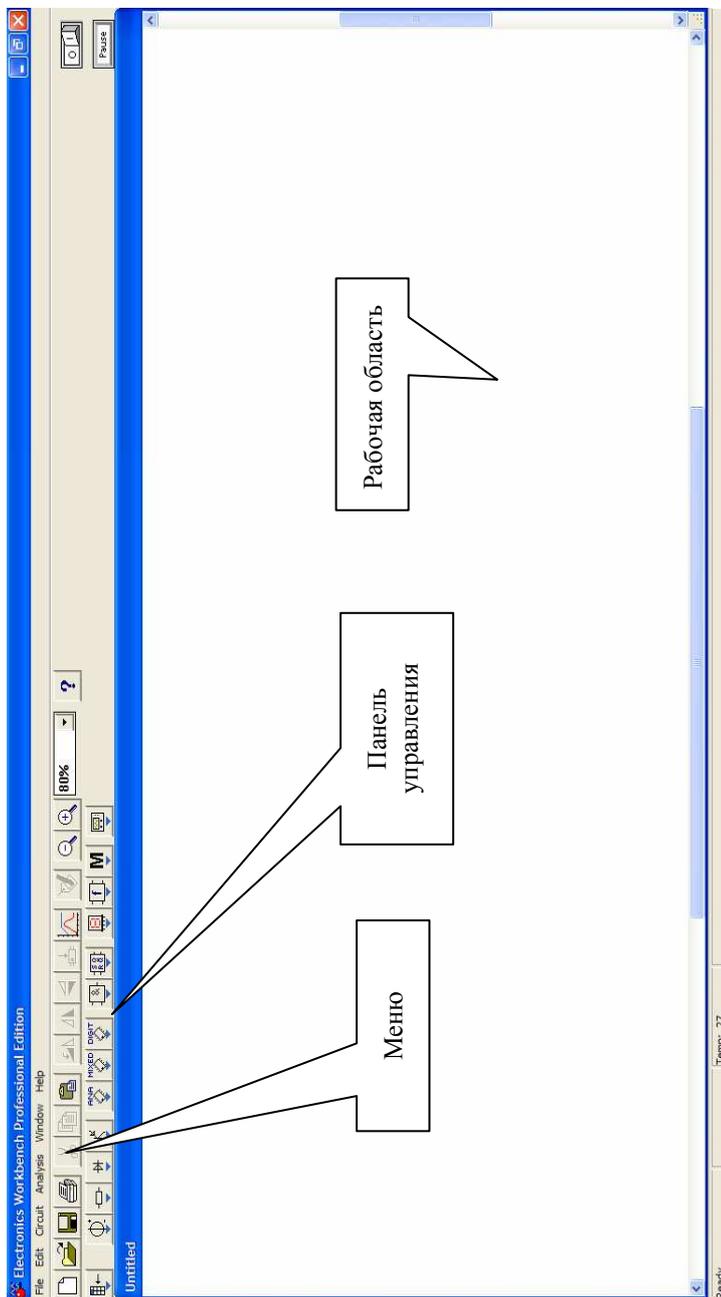


Рис. 5.1. Интерфейс пользователя

Полоса меню состоит из следующих компонент: меню работы с файлами File, меню редактирования Edit, меню работы с цепями Circuit, меню анализа схем Analysis, меню работы с окнами Window, меню работы с файлами справок Help.

Особенностью программы является наличие в панели инструментов ряда кнопок с изображением элементов радиоэлектронных схем (рис. 5.2).

Нажатие одной из этих кнопок приводит к появлению соответствующего раздела на панели инструментов, в котором находятся элементы схем.



Рис. 5.2. Панель инструментов

Построение схем. Процесс построения схемы состоит из двух этапов.

Этап 1. Перенос элементов из панелей инструментов на рабочую область и примерное расположение элементов на своих местах. При этом полезно пользоваться кнопками вращения элементов, изображёнными на рис. 5.3.

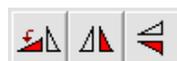
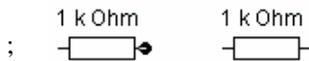


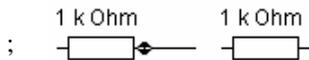
Рис. 5.3. Кнопки управления вращением элементов

Этап 2. Соединение контактов элементов. Для соединения необходимо:

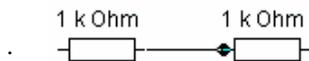
- навести курсор мыши на вывод элемента так, чтобы появилась чёрная точка контакта



- нажать левую клавишу мыши, и не отпуская её, провести проводник к элементу, с которым надо установить соединение



- отпустить клавишу мыши, когда проводник достигнет вывода другого элемента и появится его точка контакта



В случае необходимости можно добавить дополнительные узлы (разветвления). Для этого нужно перетащить элемент (узел) с панели инструментов на проводник, который надо разветвить.

Этап 3. Задание номиналов элементов. Двойной щелчок на элементе приводит к появлению диалогового окна его свойств. Содержание окна свойств существенно зависит от типа элемента. Общими для всех окон свойств являются закладки Label и Fault. В первой из них задаётся имя элемента и его обозначение (название) на схеме, во второй – возможные неисправности элемента.

Для удаления участка цепи необходимо его выделить и нажать клавишу Del.

Элементарная база *Electronics Workbench*. Программный комплекс обладает богатой элементарной базой. Рассмотрим наиболее часто используемые элементы.

Источники постоянного напряжения и тока, применяемые в программе для питания электронных схем, представлены на рис. 5.4. Источники напряжения и тока собраны в панели инструментов Sources.

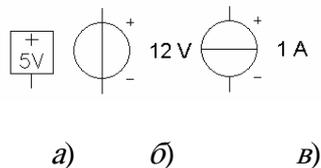


Рис. 5.4. Источники постоянного напряжения

Источник постоянного напряжения VCC (рис 5.4, а) применяется для питания цифровых схем. Батарея (рис. 5.4, б) используется для питания аналоговых и цифровых схем. Источник постоянного тока показан на рис. 5.4, в.

Источники переменного напряжения и тока применяются в качестве входных сигналов в электронных схемах. Различные источники сигналов приведены на рис. 5.5.

В источнике переменного напряжения (рис. 5.5, а) задаётся эффективное значение напряжения, частота и фаза сигнала. В источнике переменного синусоидального тока (рис. 5.5, б) задаётся эффективное значение тока, частота и фаза сигнала. В источнике прямоугольных импульсов (рис. 5.5, в) задаётся амплитуда, частота и коэффициент заполнения импульсов.

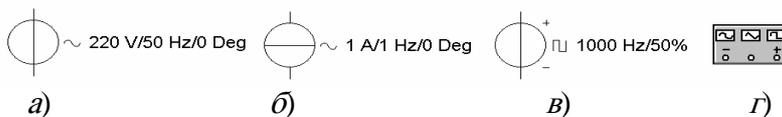


Рис. 5.5. Источники переменного напряжения

Коэффициент заполнения равен

$$\frac{\tau_n}{T} 100 \%,$$

где $\tau_{и}$ – длительность входного импульса; T – период колебаний.

Величина коэффициента заполнения обратна скважности. Коэффициент заполнения проставляется в строке Duty Cycle диалогового окна свойств элемента. Функциональный генератор (рис. 5.5, г) находится в панели Instruments, имеет два противофазных выхода и может генерировать сигналы синусоидальной, треугольной или прямоугольной формы.

Для индикации сигналов в программе Electronics Workbench имеется ряд индикаторных приборов.

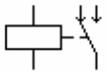
	Вольтметр. Измеряет в режиме <i>DC</i> постоянное напряжение и в режиме <i>AC</i> – переменное. Утолщенная линия вывода соответствует отрицательному потенциалу.
	Амперметр. Имеет режимы <i>AC</i> и <i>DC</i> (на схемах применены обозначения амперметра и вольтметра согласно отечественным ГОСТ).
	Цифровой индикатор. Подключается к выводам двоично-десятичного счётчика. Левый вывод подсоединяется к старшему разряду.
	Светодиод.
	Плавкий предохранитель.
	Логический пробник.
	Звуковая сигнализация.
	Десятисегментный светодиодный индикатор.

Панель инструментов *Basic* содержит **пассивные компоненты** (рис. 5.6).

1 k Ohm 	1 uF 	1 mH
[R]/1 k Ohm /50% 	1 uF 	
[L]/10 mH/50% 	1 k Ohm 	
[C]/10 uF/50% 		

Рис. 5.6. Пассивные компоненты

Панель инструментов содержит также следующие **коммутационные элементы**:



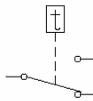
Реле.

[Space]

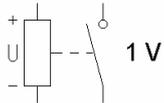


Однополюсный тумблер. Переключается клавишей «пробел» (*Space*).

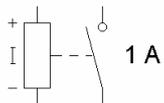
0.5 s



Реле времени с программируемым временем переключения.



Выключатель, срабатывающий в заданном диапазоне входных напряжений.



Выключатель, срабатывающий в заданном диапазоне входного тока.

Активные приборы представлены как дискретными компонентами: диоды (панель Diodes), биполярные, полевые, МДП транзисторы (панель Transistors), так и аналоговыми (панель Analog ICs) и цифровыми (панели Digital ICs, Logic Gates, Digital) микросхемами. Аналогово-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи находятся в панели Mixed ICs.

Контрольно-измерительные приборы программного комплекса Electronics Workbench находятся в панели Instruments и включают: цифровой мультиметр, функциональный генератор, двухканальный осциллограф, измеритель амплитудно-частотных характеристик, генератор слов (кодированный генератор), 16-канальный логический анализатор и логический преобразователь.

Общий порядок работы с приборами следующий.

Мультиметр. На лицевой панели мультиметра (рис. 5.7, а) расположен дисплей для отображения результатов измерения, клеммы для подключения к схеме и кнопки управления.

Нажатие кнопки Setting на лицевой панели мультиметра открывает диалоговое окно (рис. 5.7, б), на котором обозначены:

Ammeter resistance – внутреннее сопротивление амперметра;

Voltmeter resistance – входное сопротивление вольтметра;

Ohmmeter current – ток через контролируемый объект;

Decibel standard – установка эталонного напряжения V_1 при измерении ослабления или усиления в децибелах (по умолчанию $V_1 = 1$ В).

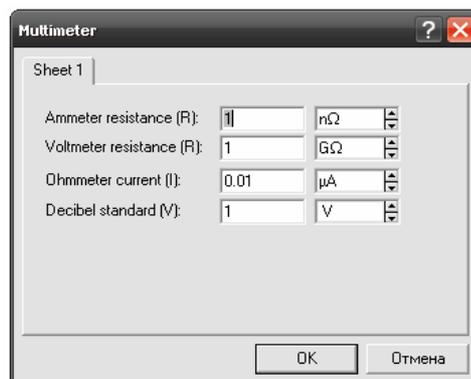
При этом для коэффициента передачи используется формула:

$$K[\text{дБ}] = 20 \log \frac{V_2}{V_1},$$

где V_2 – напряжение в контролируемой точке.



а)



б)

Рис. 5.7. Лицевая панель мультиметра

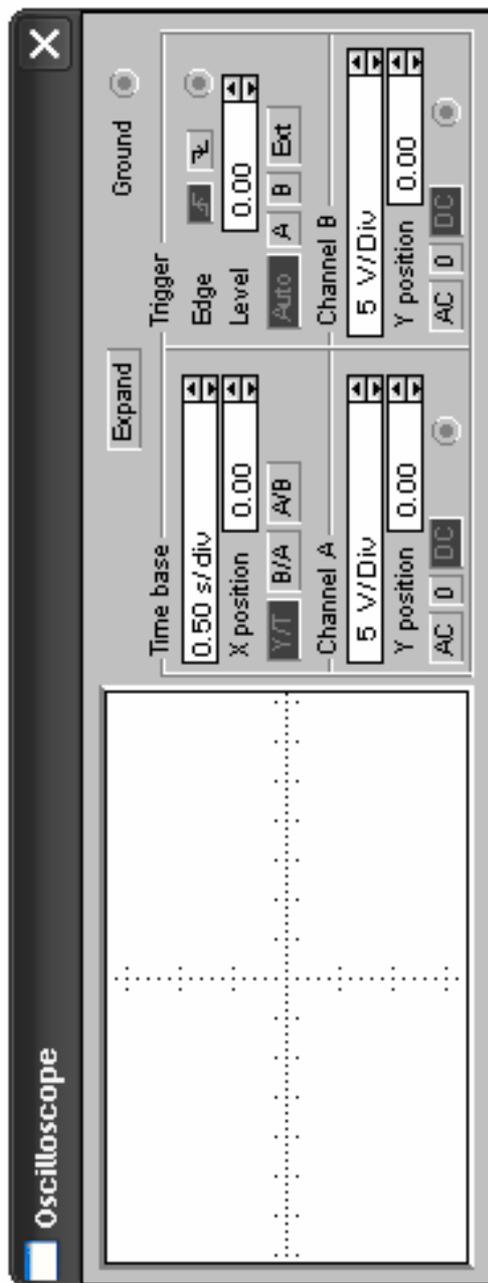


Рис. 5.8. Лицевая панель осциллографа

Осциллограф. Лицевая панель осциллографа приведена на рис. 5.8.

Осциллограф имеет два канала (CHANNEL A и B) с отдельной регулировкой чувствительности от 10 мкВ/дел до 5 кВ/дел и регулировкой смещения по вертикали (YPOS). Режим по входу выбирается кнопками AC (наблюдается только переменный сигнал) и DC (наблюдается переменная и постоянная составляющие сигнала). Обычный режим развёртки (по вертикали – напряжение сигнала, по горизонтали – время) выбирается кнопкой Y/T. В режиме B/A по вертикали откладывается напряжение канала B, по горизонтали – канала A. В режиме Y/T длительность развёртки (Time Base) может быть задана в пределах от 0,1 нс/дел до 1 с/дел. Развёртка может иметь ждущий режим (Trigger) с запуском (Edge) по переднему или заднему фронту запускающего сигнала при регулируемом уровне (Level) запуска. Режимы запуска развертки выбираются либо Auto (от канала A или B), от канала A, от канала B или от внешнего источника (Ext). При нажатии на кнопку Expand экран осциллографа увеличивается. Появляются две визирные линии, с помощью которых можно измерять напряжение, временные интервалы и их приращения. Возврат к исходному состоянию осциллографа осуществляется нажатием на кнопку Reduce.

Измеритель амплитудно-частотных (АЧХ) и фазо-частотных характеристик (ФЧХ), (Bode Plotter). Лицевая панель измерителя АЧХ-ФЧХ приведена на рис. 5.9. Измеритель предназначен для анализа АЧХ (при нажатой кнопке Magnitude) и ФЧХ (при нажатой кнопке Phase) в логарифмическом или линейном масштабе (кнопки Log и Lin). Настройка измерителя заключается в выборе пределов измерения коэффициента передачи по вертикальной оси и вариации частоты по горизонтальной оси (F – максимальное значение, I – минимальное). Считывание показаний АЧХ-ФЧХ производится с помощью ви-

зирной линии, перемещаемой мышью или кнопками ← и →. Входы измерителя Вх и Вых подключаются ко входу и выходу исследуемого устройства соответственно.

Моделирование схем можно проводить одним из следующих способов.

Первый способ. Если в схеме установлены измерительные приборы, то она запускается на моделирование включением напряжения питания тумблером, расположенным в правой верхней части экрана. Там же расположена кнопка Pause, с помощью которой можно зафиксировать процесс моделирования в определённом состоянии. На экране осциллографа просматриваются графики сигналов в выбранных узлах.

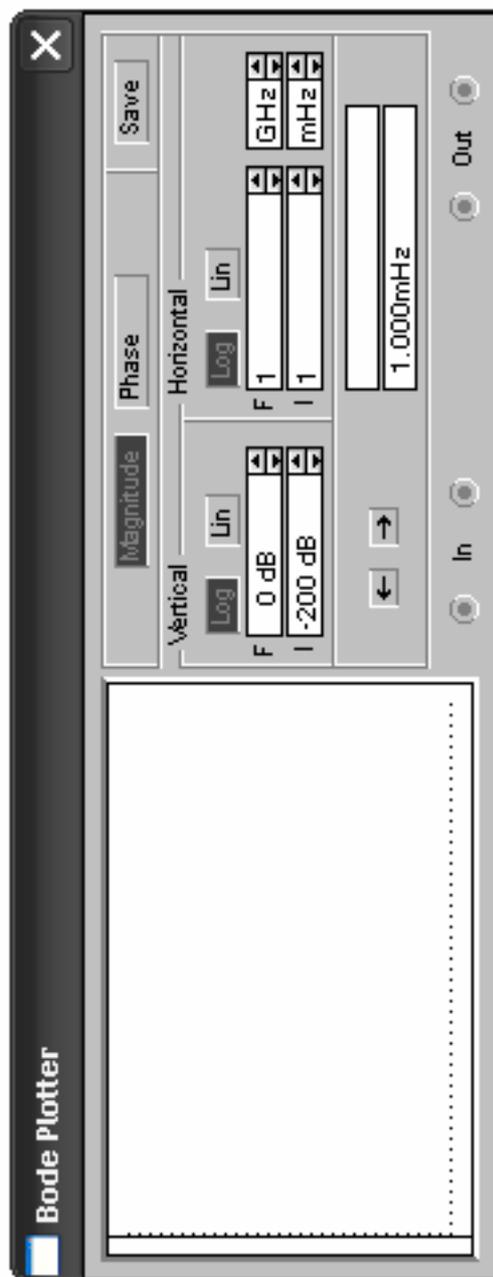


Рис. 5.9. Лицевая панель измерителя АЧХ и ФЧХ

Для лучшего визуального просмотра на осциллографе подбираются необходимые чувствительность по вертикальному каналу и длительность развёртки.

Второй способ. При этом способе измерительные приборы (например, осциллограф) на схеме не устанавливаются. Желательно сделать видимыми номера узлов с помощью команды Circuit/Schematic Options/Show nodes. Затем назначается вид анализа из меню Analysis. Например, анализ АЧХ выполняется – по команде Analysis/ AC Frequency, анализ переходных процессов – по команде Analysis/Transient, анализ по постоянному току – по команде Analysis/ DC Operating Point и др.

Далее в диалоговом окне устанавливаются параметры анализа и узлы, в которых просматриваются результаты моделирования (в поле Nodes for Analysis). Процесс моделирования запускается нажатием на кнопку Simulate. Графики моделирования представляются в окне Analysis Graphs. Окно можно уве-

личить на весь экран. Параметры сигналов просматриваются с помощью двух визирных линий, появляющихся после щелчка на значке Toggle Cursors. (Эту команду можно выполнить и из контекстного меню). Визирные линии перемещаются мышкой и устанавливаются в необходимом месте. Параметры сигналов отражаются в динамическом окне.

Виды анализа в Electronics Workbench. Рассмотрим меню Analysis программного комплекса. Первые три команды Activate, Pause и Stop аналогичны кнопкам  и .

DC Operating Point – расчёт режима по постоянному току. В этом режиме из моделируемой схемы исключаются все конденсаторы и закорачиваются все индуктивности.

AC Frequency... – расчёт частотных характеристик. Выполнение команды начинается с задания в диалоговом окне (рис. 5.10) следующих параметров:

FSTART, FSTOP – границы частотного диапазона;

Sweep type – масштаб по горизонтали (декадный, линейный или октавный);

Number of point – число рассчитываемых точек;

Vertical scale – масштаб по вертикали (линейный, логарифмический или в децибелах);

Nodes in circuit – список контрольных точек (нод) узлов цепи;

Nodes for analysis – номера нод, для которых рассчитываются характеристики.

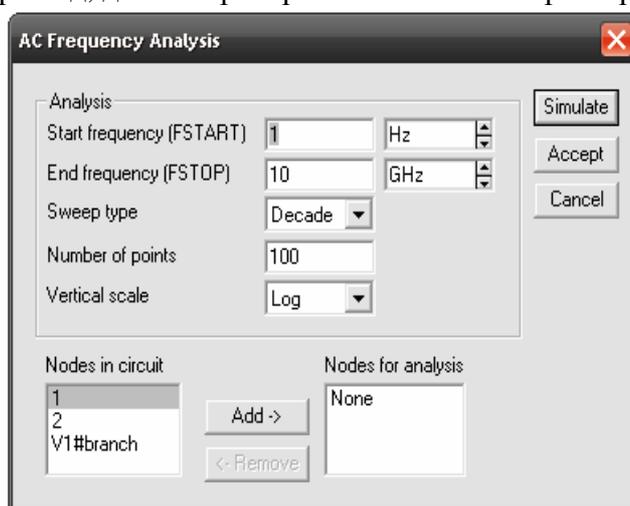


Рис. 5.10. Диалоговое окно задания параметров

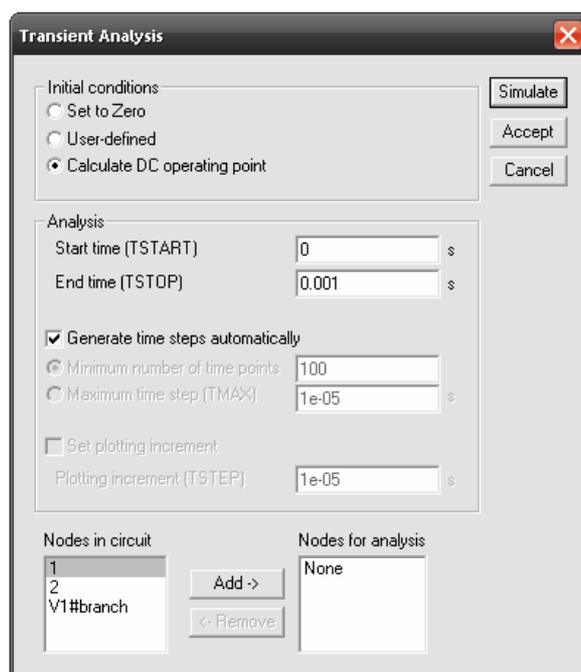


Рис. 5.11. Диалоговое окно команды

Transient... – расчёт переходных процессов. Диалоговое окно команды (рис. 5.11) содержит следующие пункты:

Initial conditions – установка начальных условий моделирования (Set to Zero – нулевое исходное состояние);

User-defined – под управлением пользователя;

Calculate DC operating point – начальные условия берутся из расчёта режима по постоянному току);

TSTART и TSTOP – время начала и окончания анализа переходных процессов;

Generate time steps automatically – расчёт переходных процессов с переменным шагом, выбираемым автоматически;

Tsteps – временной шаг вывода результатов моделирования на экран.

Fourier... – проведение спектрального анализа. Параметры моделирования задаются с помощью диалогового окна (рис. 5.12), в котором опции имеют следующие назначения:

Output node – номер контрольной точки, в которой анализируется спектр сигнала;

Fundamental frequency – основная частота колебания (частота первой гармоники);

Number harmonic – число анализируемых гармоник;

Vertical scale – масштаб по оси Y;

Advanced – набор опций этого блока предназначен для проведения более тонкой структуры анализируемого сигнала;

Number of points per harmonic – количество отсчётов на одну гармонику;

Sampling frequency – частота следования выборок;

Display phase – вывод на экран распределения фаз всех составляющих в виде непрерывной функции (по умолчанию выводится только график амплитуд);

Output as line graph – вывод на экран распределения амплитуд гармоник в виде непрерывной функции (по умолчанию – в виде линейчатого спектра).

Monte Carlo ... – статистический анализ по методу Монте-Карло. В диалоговом окне (рис. 5.13) задаются следующие основные параметры:

Number of runs – количество статистических испытаний;

Tolerance – отклонения параметров резисторов, конденсаторов, индуктивностей, источников переменного и постоянного тока и напряжения;

Speed – начальное значение случайной величины (0...32767);

Distribution type – закон распределения случайных чисел.

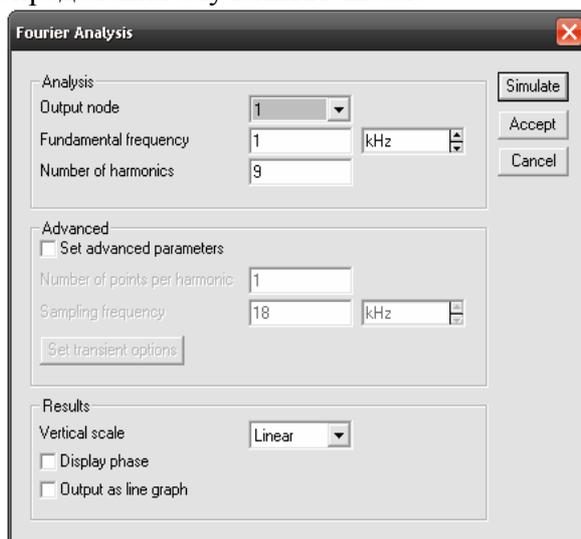
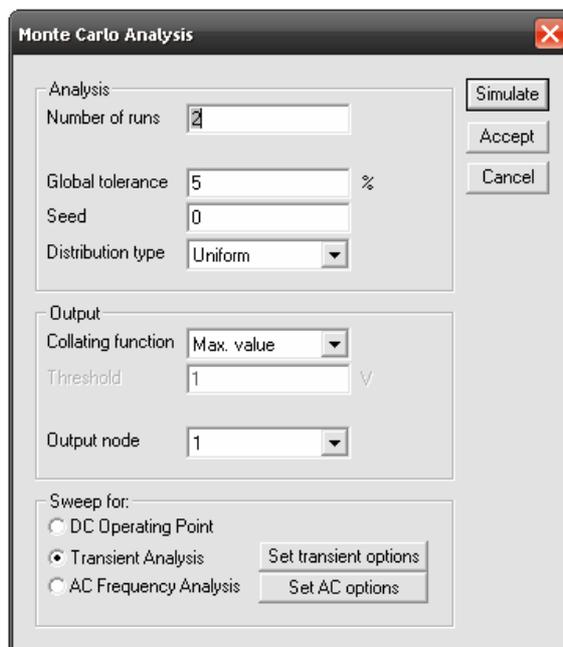


Рис. 5.12. Диалоговое окно задания параметров моделирования



**Рис. 5.13. Диалоговое окно параметров
Контрольные вопросы**

1. Какие стандартные элементы имеются в библиотеке Electronics Workbench?
2. Как производится соединение более двух входов или выходов?
3. Какой командой можно скопировать изображение схемы, подготавливаемый в текстовом редакторе MS Word?
4. Как в программе Electronics Workbench выполнить анализ цепи по постоянному току?
5. Как в программе Electronics Workbench выполнить анализ частотных характеристик цепи?
6. Как в программе Electronics Workbench выполнить анализ переходных процессов?

6. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

В курсовом проекте предусмотрено изготовление макетного образца усилительного устройства и проведение его экспериментальных исследований с последующей обработкой результатов экспериментов и проведением метрологического анализа. Полученные выводы после обработки результатов экспериментов и метрологического анализа используются при внесении коррекции в методику расчёта и математического моделирования усилительных устройств.

6.1. ПОГРЕШНОСТИ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты измерений параметров усилителя ввиду воздействия внешних и внутренних дестабилизирующих факторов будут отличаться от истинного значения измеряемого параметра на некоторую величину, которая называется погрешностью измерения. Погрешности измерений зависят от метрологических характеристик средств измерений выбранного метода измерения и воздействующих факторов.

Абсолютная погрешность измерений

$$\Delta = x_{\text{изм}} - x_{\text{д}},$$

где $x_{\text{изм}}$ – измеренное значение величины параметра; $x_{\text{д}}$ – действительное (истинное) значение измеряемого параметра.

Относительная погрешность измерений определяется отношением абсолютной погрешности к действительному значению измеряемого параметра

$$\delta = \frac{\Delta}{x_d} \cdot 100 \% .$$

Основная погрешность – погрешность измерений, полученная при нормальных условиях эксплуатации.

Дополнительная погрешность – дополнительная составляющая к основной погрешности, формирующая в результате отклонения измеряемых параметров из области допустимых значений.

Класс точности – обобщённая характеристика средства измерений, характеризующая допустимые по государственному стандарту значения основных и дополнительных погрешностей, влияющих на точность измерения,

$$K = \frac{\Delta}{N} \cdot 100 \% ,$$

где N – диапазон измерительного средства.

Систематическая погрешность – составляющая погрешности измерения, которая остаётся постоянной или закономерно изменяется при повторных измерениях одной и той же величины.

Случайная погрешность – составляющая погрешности результата измерения, которая изменяется случайным образом при повторных измерениях той же величины.

Закон нормального распределения случайных погрешностей представляется следующим образом:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_n^2}} ,$$

где $P(x)$ – плотность распределения вероятностей; x – случайная погрешность.

Аддитивная погрешность – постоянная погрешность для всех значений входного сигнала в пределах диапазона измерений, не зависит от чувствительности устройства.

Мультипликативная погрешность – изменяется пропорционально значениям входного сигнала, зависит от чувствительности средства измерения.

Динамическая погрешность – погрешность средства измерений, которая формируется в процессе измерений изменяющейся физической величины и обусловлена инерционностью средства измерений.

Статистическая погрешность – погрешность измерительного средства, которое используется для измерения параметров в установившемся режиме.

К основным характеристикам погрешности относятся следующие.

Математическое ожидание – важнейшая характеристика распределения значений случайной величины x ,

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} ,$$

где x_i – значение случайной величины; n – число измерений.

Средняя квадратическая погрешность (дисперсия) – мера отклонения от среднего значения (рассеяния)

$$D = \sigma^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - M)^2}{n-1} .$$

Доверительный интервал – интервал значений величины x , в которой попадает действительное значение x_d измеренной величины с заданной вероятностью

$$c \leq x_d \leq b .$$

Доверительная вероятность измерения – вероятность попадания действительного значения измерения величины в доверительный интервал

$$P_d = \frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{b-M}{\sigma} \right) - \Phi \left(\frac{b-M}{\sigma} \right) \right],$$

где $\Phi(t)$ – интегральная функция Лапласа; $t = \left(\frac{b-M}{\sigma} \right)$ – аргумент функции.

Закон нормального распределения случайных погрешностей изображён в виде графика на рис. 6.1.

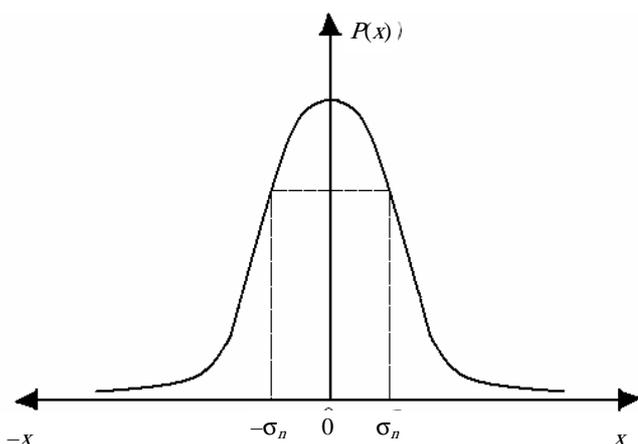


Рис. 6.1. Кривая нормального распределения случайных погрешностей

Погрешности параметров усилителя, которые определяются экспериментальным путём на разработанном и изготовленном макете усилительного устройства, рассчитываются с помощью программы Electronics Workbench.

6.2. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

Метрологический анализ позволит повысить точность параметров усилителей, которые определены в техническом задании при проектировании усилителей. При проектировании усилителей необходимо учитывать погрешности измерений при установлении допуска на выходные контролируемые параметры усилительных устройств. При установлении допуска на выходные параметры усилителя следует руководствоваться обеспечением точности параметров в соответствии с техническим заданием на проектирование усилителей, а также учитывать точность применяемых измерительных средств, которые должны быть аттестованы. Также необходимо учитывать воздействие внешних и внутренних дестабилизирующих факторов окружающей среды при проведении измерений и контроля параметров усилителя. Поэтому при проведении испытаний усилителя в лаборатории надо поставить приборы контроля дестабилизирующих факторов окружающей среды.

В результате метрологического анализа работы усилительных устройств необходимо установить причины возникновения погрешностей выходных параметров усилителей. Значительные погрешности параметров могут быть вызваны следующими факторами:

1) неточность исходной информации при расчёте усилителей – интервальное значение параметров элементной базы: коэффициентов передачи тока транзисторов, параметров используемой элементной базы в зависимости от условий, эксплуатации, режимов измерений предельных эксплуатационных режимов и условий работы усилительных устройств;

2) воздействие на усилитель внутренних и внешних дестабилизирующих факторов:

- скрытые дефекты применяемых компонентов: резисторов, конденсаторов, транзисторов;
- неточность используемой электрической схемы;
- влияние на параметры усилителя паразитных индуктивностей, ёмкостей и сопротивлений проводников печатной платы;
- нестабильность напряжения питания;
- температура окружающей среды;
- зависимость параметров от частоты;
- влажность окружающей среды;
- старение используемой элементной базы;
- изменение сопротивления нагрузки;
- воздействие электромагнитных полей;
- несовершенство технологии изготовления компонентов усилителя.

Метрологический анализ усилительных устройств на основе оценки рассчитанных погрешностей измерений и метрологических характеристик погрешностей (M , D) позволяет сделать выводы о направлении в работе по повышению стабильности работы и точности усилителя:

- 1) выделить доминирующие компоненты в составе полной погрешности результатов измерения;
- 2) определить источники доминирующих компонент погрешности и меру их влияния на результат измерений;
- 3) ввести коррекцию результатов измерения с использованием аппроксимирующих зависимостей измеряемых параметров от воздействия дестабилизирующих факторов;
- 4) по возможности устранить источники возникновения погрешностей, например, устранить дефекты печатных плат и используемых компонентов в электрической схеме усилителя;
- 5) составить алгоритм проведения экспериментальных исследований усилительного устройства;
- 6) разработать алгоритм расчёта введения коррекции и поправок результатов измерения при воздействии дестабилизирующих факторов.

Устранение причин возникновения погрешностей или учёт их воздействия на параметры усилителя позволит обеспечить безотказную работу и повысить качество проектируемых усилительных устройств.

Контрольные вопросы

1. Как определяются абсолютная и относительная погрешности измерений?
2. Какие погрешности относятся к основным и дополнительным?
3. Что такое класс точности измерительного средства?
4. Чем отличаются систематическая и случайная погрешности?
5. Какая погрешность не зависит от чувствительности измерительного средства?
6. Какая погрешность изменяется пропорционально значениям входного сигнала?
7. Чем отличается статическая и динамическая погрешности?
8. Какие метрологические характеристики погрешностей Вы знаете?
9. Как определяется математическое ожидание?
10. Как определить среднюю квадратическую погрешность (дисперсию)?
11. Что такое «доверительный интервал» и «доверительная вероятность» измерения?
12. В чём сущность закона нормального распределения случайных погрешностей?
13. Какие дестабилизирующие факторы влияют на погрешности определения параметров усилителя?
14. С какой целью проводится метрологический анализ усилительных устройств?
15. Какие существуют способы повышения стабильности и точности усилителей?

7. НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Совершенствование и модернизация усилительных устройств является неотъемлемой частью разработки радиоэлектронных средств. Совершенствование усилительных устройств рекомендуется осуществлять по следующим основным направлениям:

1. *Улучшение качественных характеристик усилителя:* точности выходных параметров и характеристик, стабильности и устойчивости работы, надёжности. Для повышения устойчивости усилительных устройств необходимо использовать разнообразную топологию печатных плат, которая влияет на ёмкость монтажа.

2. *Оптимизация качественно-количественных характеристик усилителя:* расширение диапазона усиливаемых частот, увеличение выходной мощности.

3. *Разработка архитектуры усилительных устройств* на основе широкого использования обратных связей для формирования входного и выходного сопротивлений, амплитудно-частотных характеристик, обеспечения стабильности коэффициента усиления, стабилизации рабочей точки активного элемента и других параметров, а также уменьшения искажений сигнала на выходе усилителя.

4. *Улучшение конструктивно-технологических* показателей связано с разработкой конструкции усилителя в микроминиатюрном исполнении с соблюдением требований стандартов по дизайну, эргономике, ремонтпригодности и применением элементной базы, созданной на основе новых физических процессов и технологий изготовления, применением высокотехнологических методов для изготовления печатной платы при изготовлении усилителя.

5. *Проведение математического моделирования* на компьютере при разработке усилительных устройств с целью выбора оптимального варианта схемотехнического решения, расчёта параметров и характеристик усилителя, выполнения метрологического анализа погрешностей измерения, анализа частотных и переходных характеристик с учётом отклонения и нестабильности параметров и характеристик усилителя при воздействии дестабилизирующих факторов.

6. *Разработка принципиальных электрических схем* усилителей с использованием новой современной элементной базы, отличающейся высокой стабильностью параметров, надёжностью и устойчивостью к воздействию дестабилизирующих факторов.

7. *Оптимизация схемотехнических решений* необходима для решения важнейшей задачи при передаче входных сигналов в усилителе – повышение линейности проходных передаточных характеристик усилителя, уменьшение шумов в усилителе и повышение чувствительности по входу.

8. *Для улучшения технико-экономических характеристик* рекомендуется замена в усилителе дорогостоящих компонентов с последующей модернизацией усилителя.

8. РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАКЕТА ПЕЧАТНОГО УЗЛА УСИЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА И ЕГО НАСТРОЙКА

Разработка и изготовление макетного образца усилителя, настройка его в соответствии с заданием на курсовое проектирование будут способствовать приобретению практических навыков изготовления электронного устройства, технологии изготовления печатной платы, изучения способов установки элементов на печатной плате, настройки и регулировки, согласования с источником входного сигнала и нагрузкой. При изготовлении макета печатного узла усилителя, изготовления печатной платы, установки элементов, регулировки и настройки следует пользоваться рекомендованной в данном пособии литературой и соответствующими ГОСТ.

8.1. РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАКЕТА ПЕЧАТНОГО УЗЛА УСИЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

При разработке макета печатного узла необходимо ознакомиться с основными определениями, используемыми при изучении технологии изготовления макета усилителя.

Печатным узлом называется печатная плата с установленными на ней электрорадиоэлементами.

Печатная плата – изоляционное основание с нанесённым на него печатным монтажом.

Печатный монтаж – совокупность печатных проводников, соединяющих электрорадиоэлементы, которые будут установлены на печатную плату.

Печатный проводник – полоска токопроводящего покрытия.

Координатная сетка чертежа печатной платы определяет положение элементов рисунка платы.

Шаг координатной сетки – постоянная величина, определяющая расстояние между соседними линиями координатной сетки.

Односторонняя печатная плата имеет одно основание, на одной стороне которого выполнен проводящий рисунок.

Фольгированный материал – материал основания печатной платы, который имеет с одной или с двух его сторон проводящую фольгу.

Класс точности печатной платы определяет минимально возможные размеры контуров проводящего рисунка в зависимости от токов и напряжений.

Разработка и изготовление печатного узла усилителя включает следующие этапы:

1. Изучить электрическую схему усилительного устройства в соответствии со своим вариантом задания на курсовое проектирование.

2. Для заданной электрической схемы составить перечень используемых электрорадиоэлементов в соответствии с приложением Г.

Электрорадиоэлементы к электрической схеме студенты должны использовать современного отечественного и зарубежного производства. При этом необходимо пользоваться справочной литературой издания последних трех–пяти лет. Выбирая компоненты, следует учитывать допустимые рабочие диапазоны их эксплуатации при воздействии внешних и внутренних дестабилизирующих факторов: температуры окружающей среды, влажности, вибрации и др.

3. Составить спецификацию к печатному узлу усилителя по образцу приложения Д.

4. Для заданной электрической схемы подготовить чертёж печатной платы (приложение Е).

В настоящее время для конструирования печатных плат применяются системы автоматизированного проектирования, в частности, система P-CAD. Информацию о программе P-CAD можно найти в интернете по адресу www.pcad.ru. Чертежи печатных плат выполняются в соответствии с ГОСТ 2.417–91. Платы печатные. Правила выполнения чертежей.

5. Изготовить печатную плату химическим методом по инструкции, приведенной в рекомендованной литературе.

Химический метод заключается в процессе вытравливания незащищённых участков фольги, предварительно наклеенной на диэлектрик. Для изготовления печатной платы использовать фольгированный стеклотекстолит, который имеет свойство вытравливать определённые участки фольги в специальном растворе, например, хлорного железа. Печатную плату изготовить 2-го класса точности с невысокой плотностью монтажа, с шириной печатного проводника 0,45 мм.

6. Подготовить сборочный чертёж печатного узла по образцу (приложение Ж).

7. Осуществить комплектацию электрорадиоэлементов в соответствии с составленным перечнем элементов.

8. Выполнить входной контроль электрорадиоэлементов.

Входной контроль электрорадиоэлементов осуществляется по геометрическим размерам, форме, внешнему виду, электрическим параметрам и механической прочности.

9. Подготовить печатную плату к монтажу.

Подготовка печатных плат к монтажу заключается в их промывке, контроле печатного монтажа и паяемости, маркировке платы.

10. Подготовить электрорадиоэлементы к монтажу в зависимости от способа их установки на печатную плату в соответствии с ОСТ 45.010.030–93.

При изготовлении печатного узла электрорадиоэлементы монтируются в монтажные отверстия печатных плат, которые используются также для электрических соединений с поводящим рисунком на плате.

При подготовке электрорадиоэлементов к монтажу выполняется рихтовка их выводов, гибка по форме, обрезка и лужение. Формовка выводов элементов и их установка на печатную плату производится в соответствии с ГОСТ 29137–91 (Формовка выводов и установка изделий электронной техники на печатные платы. Общие требования и нормы конструирования). Высота выступающих выводов элементов должна быть от 0,5 до 2 мм.

11. Осуществить маркировку электрорадиоэлементов и других компонентов на печатной плате.

12. Выполнить пайку контактных соединений электрорадиоэлементов и других компонентов на печатной плате расплавленным припоем под действием постоянного или импульсного нагрева зоны соединения следующим образом: нанести на место пайки флюс, на рабочую часть паяльника – припой, и приложить паяльник к подготовленному месту соединения на три-пять секунд до момента течения припоя.

13. Провести промывку и сушку изготовленного печатного узла усилителя.

Технологические операции промывки и сушки изготовленного печатного узла необходимы для удаления флюса и продуктов пайки.

14. Осуществить контроль, настройку и регулировку усилительного устройства с помощью измерительной аппаратуры.

15. Провести испытания усилителя при воздействии основных дестабилизирующих факторов.

16. В процессе изготовления печатного узла, монтажа элементов на печатной плате, операций настройки и регулировки студентам необходимо строго придерживаться правил техники безопасности на рабочем месте для исключения случаев травматизма.

8.2. НАСТРОЙКА УСИЛИТЕЛЯ В СООТВЕТСТВИИ С ЗАДАНИЕМ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

При разработке и изготовлении макета усилительного устройства, отвечающего требованиям технологического задания на проектирование и требованиям качества применительно к рассматриваемому усилителю, необходимо контролировать параметры исходных материалов, комплектующих компонентов, технологических операций пайки и монтажа, качества монтажных соединений электрорадиоэлементов, применять средства контроля работоспособности печатного узла усилителя в целом.

Контроль усилительного устройства заключается в получении информации о параметрах и характеристиках усилителя для оценки качества его изготовления.

Регулировка и настройка – это технологические операции, в результате проведения которых параметры и характеристики усилителя должны соответствовать техническому заданию на их изготовление.

Применяемый вид настройки и регулировки – эксплуатационный, метод регулировки – с использованием измерительной аппаратуры.

Основные этапы настройки и регулировки усилителя:

1) проверка правильности печатного монтажа платы, монтажа электрорадиоэлементов на печатной плате;

2) проверка режимов работы полупроводниковых приборов (транзисторов);

3) настройка и регулировка усилителя в целом.

Технологическая инструкция по контролю, проверке и регулировке включает следующие операции:

1. Оборудование рабочего места измерительными приборами: блоком стабилизированного питания, осциллографом типа GOS-620, генератором типа GFG-8216 А, мультиметром GDM-8135.

2. Выполнение требований техники безопасности:

а) прежде чем приступить к настройке и регулировке, необходимо изучить руководство по эксплуатации измерительного прибора;

б) запрещается при работе с прибором снимать защитный кожух;

в) необходимо заземлить корпус прибора перед подключением к электросети;

г) при работе с измерительными приборами следует использовать диэлектрический коврик на полу рабочего места;

д) после завершения работы с приборами необходимо отключить их от электросети.

3. Проведение процесса контроля:

а) проверить комплектность компонентов в соответствии с перечнем элементов и спецификацией;

б) выполнить контроль геометрических и функциональных параметров компонентов;

в) проверить соответствие качественных и количественных характеристик компонентов и усилителя в целом требованиями нормативно-технической документации и технического задания.

4. Выполнение операций регулировки и настройки усилительного устройства:

а) регулировку осуществить с использованием измерительных приборов;

б) выявить некачественные соединения и пайку;

в) проверить правильность монтажа в соответствии с электрической схемой;

г) проверить режимы работы полупроводниковых приборов по справочным данным;

д) провести проверку функционирования устройства в целом, регулировку и настройку для получения заданных характеристик усилителя в соответствии с техническим заданием на проектирование;

е) регулировку и настройку провести по электрической схеме усилителя с учётом требований технического задания и условий эксплуатации, при необходимости заменить установленные электрорадиоэлементы, полупроводниковые приборы для получения оптимальных параметров.

В соответствии с приведённой технологической инструкцией провести контроль, регулировку и настройку усилителя:

а) подключить к усилителю источник стабилизированного питания, предварительно установив требуемое для данного усилителя напряжение;

б) подсоединить измерительные приборы (цифровой мультиметр, генератор, осциллограф) к соответствующим клеммам входа и выхода усилителя;

в) на лицевой панели измерительных приборов установить необходимо пределы измерений контролируемой величины;

г) включить измерительные приборы и источник питания;

д) записать технические характеристики выходного сигнала блока по данным мультиметра и осциллографа – частоту, амплитуду и период;

е) проверить соответствие выходных параметров и характеристик техническому заданию.

ж) если параметры и характеристики отличаются от указанных в задании на проектирование, то необходимо повторить контроль, регулировку и настройку усилителя в соответствии с приведённой технологической инструкцией.

При настройке и регулировке усилительного каскада на транзисторах необходимо:

1) проверить стабильность токов, токов покоя транзисторов, в случае их нестабильности использовать существующие схемы стабилизации рабочей точки;

2) снять передаточную характеристику усилителя и оценить её линейность;

3) по экспериментальным данным рассчитать коэффициент усиления по напряжению, сравнить с расчётным и заданным значениями. Внести изменения в электрическую схему (изменить сопротивление коллектора, делитель напряжения на выходе) для получения требуемой величины коэффициента усиления. Регулировка коэффициента усиления осуществляется изменением делителя напряжений на входе усилителя (изменением сопротивления переменного резистора в составе делителя). Коэффициент усиления можно регулировать, изменяя глубину отрицательной обратной эмиттерной связи, поставив в цепь эмиттера делитель с переменным резистором;

4) с использованием измерительной аппаратуры снять амплитудно-частотную характеристику, по которой определить полосу пропускания усилителя и сравнить с заданным рабочим диапазоном частот. При несоответствии техническому заданию на проектирование внести коррекцию времязадающей RC-цепи обратной связи усилителя;

5) оценить нелинейные искажения в усилителе, рассчитать коэффициент гармоник и сравнить с заданным допустимым его значением в исходных данных для проектирования. На линейные и нелиней-

ные искажения усилителя влияет паразитная обратная связь. Паразитная связь может быть между входом и выходом усилителя в результате ёмкостной связи через параллельную обратную связь по напряжению и через цепи питания в многокаскадных усилителях. Для устранения или уменьшения паразитных обратных связей параллельно выводам источника питания ставится конденсатор или развязывающий фильтр в цепи питания.

8.2.1. Испытания усилительных устройств

После окончания операций контроля, настройки и регулировки проводятся процедуры испытания изготовленного усилителя. Испытания выполняются по методике, которая заключается в воздействии на усилитель внешних факторов (изменение температуры окружающей среды, влажности и механических воздействий) и осуществлении непрерывности работы с последующим контролем параметров и характеристик при окончании испытаний.

Воздействие внешних факторов приводит к отказам и неустойчивой работе радиоэлектронных средств, а также к их старению.

При выполнении индивидуального задания на курсовое проектирование проводятся исследовательские испытания, связанные с изучением требуемых свойств разрабатываемого устройства. В этом случае целесообразно анализ работы устройства проводить с использованием имитационного моделирования при воздействии дестабилизирующих факторов.

Испытания при воздействии внешних факторов проводятся следующие:

1. Электрические, при которых проверяются параметры и характеристики при изменении электрической нагрузки, контролируются электропитание и потребляемая мощность.

2. Температурные испытания осуществляются при воздействии на усилитель температуры окружающей среды. Температурные влияния ускоряют старение материалов, ухудшают электрические свойства усилителей в результате изменения сопротивления резисторов, изоляции диэлектриков, ёмкости конденсаторов, изменяются параметры транзисторов, уменьшается влагонепроницаемость покрытия. Для создания условий высокой или низкой температуры макет устройства помещается в термокамеру и затем после воздействия тепла и холода проверяют параметры и характеристики устройства.

3. Испытания на влагоустойчивость выполняются при помещении устройства в камеру влажности при заданной определённой температуре, а затем осуществляется контроль выходных параметров, так как с увеличением влажности уменьшаются объёмное и поверхностное сопротивления изоляционных материалов

4. Механические воздействия способствуют возможным изменениям параметров радиоэлектронных устройств. Испытания на мехвоздействия (проверка вибро- и ударопрочности) проводится при помощи устройства на вибростенд и затем проверяют сохранение его работоспособности в результате контроля и анализа параметров и характеристик.

Контрольные вопросы

1. Что называется печатным узлом?
2. Какие этапы включает процесс разработки и изготовления печатного узла?
3. Что подразумевается под контролем усилительного устройства?
4. Из каких этапов состоит процедура настройки и регулировки усилителя?
5. По какому методу выполняется регулировка усилителя?
6. Какие операции необходимо выполнить при настройке и регулировке?
7. Какое воздействие на усилитель оказывают внешние дестабилизирующие факторы?
8. Какие испытания проводятся при воздействии внешних факторов?
9. Каким образом проводятся испытания усилителя температурные, на влагоустойчивость и на механические воздействия?
10. Как осуществляется коррекция параметров и характеристик усилителя при несоответствии их техническому заданию на проектирование?

9. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Студенты приступают к выполнению курсового проекта после утверждения задания на курсовое проектирование преподавателем и заведующим кафедрой. Курсовой проект должен быть выполнен в срок, указанный в задании на проектирование.

В процессе работы над курсовым проектом студенты могут получать консультации в отведённые часы, согласно утверждённому расписанию консультации в течение семестра.

Студенты должны составить план работы над курсовым проектом и согласовать его с руководителем. План составляется, исходя из отведённого времени на проектирование.

Работа над курсовым проектом включает следующие основные этапы:

1. Ознакомиться с заданием на курсовой проект и получить консультации у преподавателя по возникающим вопросам.

2. Изучить рекомендуемую учебную литературу по теме курсового проекта, лекции по электронике, учебные пособия по курсовому проектированию, журналы по электронике, схемотехнике электронных устройств, справочники по полупроводниковым приборам, ГОСТ.

3. По рекомендованной учебной литературе изучить теорию и принцип действия усилительных устройств, физические процессы, происходящие в транзисторах и усилителях на их основе. Транзисторы и используемую элементную базу к разрабатываемой электрической схеме усилителя следует выбирать из справочников по полупроводниковым приборам, исходя из рассчитанных параметров транзистора. Правила выполнения чертежей, электрической схемы и обозначения элементов на схеме необходимо выполнять по рекомендуемым ГОСТ.

4. Разработка усилительных устройств связана с процессом анализа известных схемотехнических решений и информации о видах, параметрах и характеристиках усилителей, условий эксплуатации, изучения вопросов согласования с источником сигнала и нагрузкой. Следует изучить существующие принципиальные электрические схемы усилительных устройств, методы их расчёта, анализа и синтеза. Необходимо выполнить их анализ, выявить недостатки и определить направление совершенствования усилителей.

5. По рекомендуемой литературе изучить способы и технологию изготовления печатного узла при создании макета усилительного устройства, методы контроля параметров усилителя, настройки, регулировки и испытания в соответствии с техническим заданием на проектирование.

При разработке печатного узла необходимо составить перечень электрорадиоэлементов, установочных изделий (панелей, лепестков, разъёмов и др.) и крепёжных (болтов, гаек, шайб и др.). Выбирая компоненты печатного узла, желательно использовать стандартные элементы и детали – конденсаторы, резисторы, разъёмы и др. Следует изучить компоновку элементов усилителя на печатной плате, определить разъёмы и клеммы для подачи электропитания, подключения источника входного сигнала и нагрузки, способ крепления установочных элементов.

9.1. РЕКОМЕНДУЕМАЯ МЕТОДИКА РАСЧЁТА УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Разрабатывая усилительное устройство на базе биполярных транзисторов и выполняя его расчёт, необходимо подробно изучить принцип действия биполярных транзисторов, его структуру. Рассмотреть принцип действия транзистора следует при включении транзистора по схеме с ОБ, ОЭ, ОК. При этом исследовать его режимы работы, усилительные свойства и параметры, определение входного и выходного сопротивлений, выходной мощности, статические входные и выходные характеристики. Следует изучить эквивалентные схемы, которые используются для расчёта транзисторов: Эберса-Молла, Т-образную эквивалентную схему для переменных составляющих сигнала, эквивалентную схему в h -параметрах.

При изучении частотных свойств транзистора следует рассмотреть эквивалентную схему транзистора для высоких частот и физические процессы и параметры, определяющие предельную рабочую частоту транзистора. Изучить понятие шума и причину появления шумов транзистора, зависимость шума от частоты.

В полевых транзисторах, в отличие от биполярных, ток управляется с помощью электрического поля. Принцип их действия основан на формировании тока стока изменением толщины проводящего канала в результате сужения или расширения обеднённой области $p-n$ -перехода в полевых транзисторах с управляющим $p-n$ -переходом. Следует изучить характеристики и параметры полевого транзистора, понятие напряжений насыщения и отсечки.

Необходимо изучить МДП-транзисторы, их параметры, особенности, частотные характеристики, принцип действия с индуцированными и со встроенными каналами.

Студенты должны в полном объёме изучить и повторить схемотехнику усилительных устройств: архитектуру усилителей (схемы включения с ОЭ, ОБ, ОК, виды обратных связей), формирование характеристик и параметров при воздействии обратных связей, методику расчёта и анализа искажений сигналов, регулировку усилителей, учёта и возможного устранения паразитных обратных связей в усилителе (ёмкостной и через источник питания).

В пояснительной записке курсового проекта приводятся краткие теоретические сведения по принципу действия усилительного устройства; о методах анализа, особенностях проектируемого усилителя, основных параметрах и характеристиках и расчётных аналитических зависимостях, приведённых в рекомендуемой литературе для известных аналогичных усилительных устройств.

При расчёте усилителя необходимо провести анализ исходных данных в задании для проектирования, рассмотреть условия эксплуатации, учитывая воздействие основных дестабилизирующих факторов: температуры окружающей среды, нестабильности напряжений источника питания, влияние паразитных связей и т.д.

Рассчитывая параметры усилителя, например коэффициент усиления, полосу пропускания и другие, необходимо увеличить допустимый интервал их значений, так как существует разброс параметров используемых в усилителе электрорадиоэлементов (конденсаторов, резисторов, транзисторов) из-за производственной погрешности их изготовления.

После выполнения расчёта параметров электрорадиоэлементов (транзисторов, резисторов, конденсаторов) выбираются по справочникам конкретные типы элементов, выпускаемые промышленностью, в соответствии с их условиями эксплуатации и обоснованными допусками, и далее используются не расчётные, а номинальные их значения. При выборе номинальных значений конденсаторов, если расчётные значения являются близкими и к меньшему и большему номинальным значениям, следует руководствоваться их месторасположением в схеме и влиянием на граничную частоту транзистора, полосу пропускания и искажения сигнала в частотной полосе.

Обоснование выбора типа и номинала электрорадиоэлементов приводится в расчётной части пояснительной записки только для нескольких электрорадиоэлементов, а для остальных элементов указываются выбранные из справочников их номинальные значения.

Расчёт и анализ усилительного устройства в курсовом проектировании рекомендуется проводить на компьютере с использованием известных программных продуктов, например Electronics Workbench.

Методика расчёта усилительного устройства каскада включает несколько этапов и предполагает применение графо-аналитического метода расчёта с использованием известных аналитических зависимостей параметров транзисторов и усилителей и определением параметров транзисторов с использованием их статических входных и выходных характеристик.

Основные этапы расчёта:

1. Анализ исходных данных для расчёта усилителя.
2. Выполняется расчёт усилителя по постоянному току, определяются значения резисторов, h -параметры транзистора. Проводится графическое построение нагрузочной прямой по постоянному току, определяются рабочая точка, ток и напряжение покоя транзистора.
3. Проводится расчёт усилительного каскада по переменному току, выполняется графическое построение нагрузочной прямой по переменному току, определяются токи и напряжения на входе и выхо-

де усилителя, рассчитываются усилительные параметры (коэффициенты усиления каскада по току, напряжению и мощности, входное и выходное сопротивления усилителя).

4. Построение частотных характеристик усилителя, определение полосы пропускания, расчёт значений ёмкостей конденсаторов усилителя.

5. Выполняется оценка искажений усилителя, рассчитываются коэффициент шума и предельная рабочая частота по шуму.

9.2. ПРИМЕР РАСЧЁТА ОДНОКАСКАДНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ ПО СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

Схема усилительного каскада на биполярном транзисторе с ОЭ приведена на рис. 9.1.

Усилительный каскад выполнен на биполярном транзисторе $n-p-n$ -типа. На вход усилителя подключен источник входного сигнала E_c ,

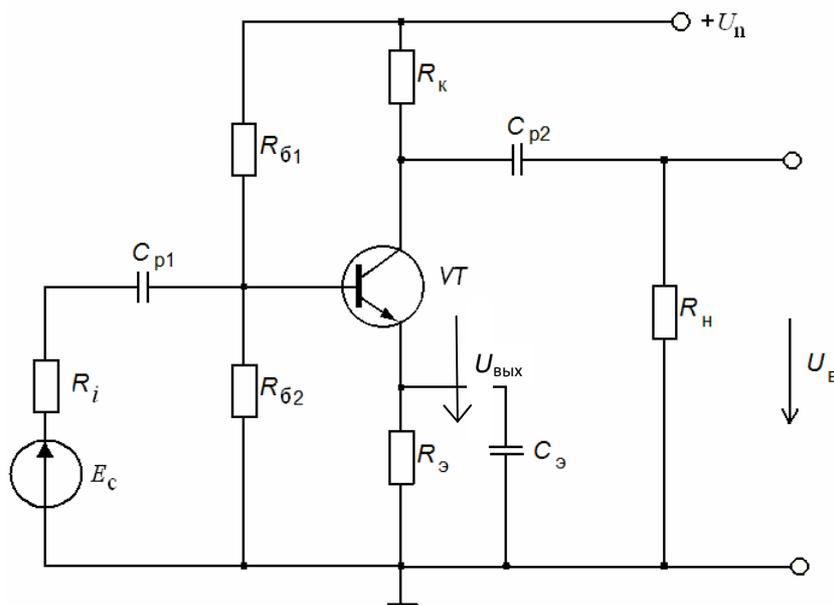


Рис. 9.1. Схема усилительного каскада с ОЭ

который имеет внутреннее сопротивление R_i . Конденсаторы C_{p1} и C_{p2} предназначены для разделения режима работы усилителя по постоянному току, не пропускают постоянную составляющую переменного сигнала. Резисторы $R_{б1}$ и $R_{б2}$ составляют делитель напряжения на входе транзистора, формируют напряжение смещения, которое определяет положение рабочей точки транзистора на нагрузочной прямой на выходных характеристиках транзистора. Резистор $R_к$ является нагрузочным в цепи коллектора по постоянному току, определяет выходное сопротивление усилительного каскада и коэффициент усиления по напряжению K_U . С увеличением значения $R_к$ (до определённого ограничения) коэффициент K_U возрастает.

Для термостабилизации рабочей точки транзистора применяется последовательная отрицательная обратная связь по току, которая формируется через резистор $R_э$. Конденсатор $C_э$ является шунтирующим, служит для увеличения коэффициента усиления каскада по переменной составляющей, а также для формирования частотной характеристики усилителя.

Усилительный каскад на рис. 9.1 имеет параллельную структуру, является фазоинверсным, так как фаза выходного напряжения изменяется на угол π по отношению к входному напряжению. Усилитель с ОЭ усиливает входной сигнал по току, напряжению и мощности. Входное сопротивление каскада определяется сопротивлениями $R_{б1}$, $R_{б2}$ и входным сопротивлением транзистора h_{11} . Выходное сопротивление каскада зависит от сопротивления коллектора

$$R_{\text{вых}} \approx R_к \approx \frac{1}{h_{22}}.$$

Коэффициент усиления по напряжению определяется зависимостью выходного напряжения от входного

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}.$$

Ток коллектора рассчитывается на основе тока базы $I_б$ и коэффициента передачи тока базы β

$$I_k = \beta I_б.$$

Частотные свойства усилителя зависят от частотных характеристик базового транзистора, выходного сопротивления источника сигнала и нагрузки.

Нелинейные искажения усилительного каскада определяются внутренним сопротивлением генератора на входе, сопротивлением нагрузки и уровнем амплитуды выходного сигнала.

Усилительные каскады на биполярных транзисторах находят наибольшее применение в предварительных усилительных каскадах, так как усиливают ток и напряжение, а следовательно, обеспечивается усиление сигнала по мощности.

9.2.1. Исходные данные и результаты расчёта усилителя

Для выполнения расчёта усилительного устройства необходимо иметь исходные данные для расчёта, которые указываются в задании на курсовое проектирование, и перечень параметров и характеристик, которые надо соответственно рассчитать и выполнить графическое построение.

Исходными данными для расчёта усилительного каскада с общим эмиттером являются следующие:

- 1) U_n – напряжение источника питания;
- 2) U_m – амплитуда напряжения на выходе усилительного каскада;
- 3) R_n – сопротивление нагрузки;
- 4) уровни рабочего диапазона частот: f_n , f_b – нижнее и верхнее значения усиливаемой полосы частот;
- 5) значения допустимого уровня частотных искажений на нижней и верхней граничных частотах: M_n , M_b – уровни частотных искажений на нижней и верхней граничной частоте;
- 6) рабочий диапазон температур окружающей среды: t_{min} , °С, t_{max} , °С – минимальное и максимальное значения температуры;
- 7) R_i – сопротивление источника входного сигнала;
- 8) режим работы усилительного каскада – класс А. В этом режиме ток в выходной цепи транзистора протекает весь период действия входного сигнала, напряжение смещения $U_{\text{см}} > 0$, рабочая точка покоя находится в середине нагрузочной прямой. Транзистор работает в линейной области, поэтому класс А характеризуется минимальными нелинейными искажениями усиливаемого сигнала. Коэффициент полезного действия не более 0,5, в связи с этим класс усиления А используют в усилителях малой мощности.

В результате расчёта и анализа усилительного каскада должны быть определены, рассчитаны параметры транзистора и каскада и выполнено графическое построение следующим образом:

1. Выбрать тип транзистора по рассчитанным: току коллектора I_k , мощности транзистора P , верхней рабочей частоте f_b и напряжению $U_{кз}$, и вольтамперные статические входные и выходные характеристики.
2. На статических характеристиках построить нагрузочную прямую, рабочую точку и определить ток и напряжение покоя ($I_{кп}$, $U_{кэп}$).
3. По статическим входным и выходным характеристикам определить h -параметры транзистора:
 h_{11} – входное сопротивление;
 h_{12} – коэффициент обратной связи по напряжению;

h_{21} – коэффициент передачи тока базы;

h_{22} – выходную проводимость.

4. Рассчитать номинальные значения сопротивлений и ёмкостей конденсаторов принципиальной электрической схемы усилительного каскада.

5. $R_{вх}$ – входное сопротивление усилителя.

6. $R_{вых}$ – выходное сопротивление усилителя.

7. K_U – коэффициент передачи (усиления) по напряжению входного сигнала.

8. K_I – коэффициент передачи по току входного сигнала.

9. K_P – коэффициент усиления по мощности входного сигнала.

10. Определить частотные искажения усилителя.

11. Построить схемы замещения усилительного каскада.

12. Определить передаточные функции для схем замещения усилителя.

13. На основе передаточных функций схем замещения построить амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики усилителя.

9.2.2. Расчёт усилителя по постоянному току

Рассмотрим пример расчёта усилителя с ОЭ для следующих исходных данных при расчёте усилительного каскада с ОЭ, схема которого приведена на рис. 9.1:

$U_{п} = 25$ В; $R_{н} = 120$ Ом; $f_{н} = 10$ Гц; $M_{н} = 1,1$; $M_{в} = 1,3$;

$t_{\min} = 0$ °С; $t_{\max} = 100$ °С; $R_f = 1$ кОм.

Выбираем транзистор VT, исходя из выполнения следующих условий.

Сопротивление коллектора

$$R_k = K_n R_n,$$

где $K_n = 5 \dots 10$.

Выбираем $R_k = 10 \cdot 120$ Ом = 1200 Ом (для максимального значения K_n). Рассчитанное значение R_k соответствует стандартному ряду и принимаем $R_k = 1200$ Ом.

$U_{кэ\max\ доп} \geq U_{п}$, принимаем $U_{кэ\max\ доп} = 25$ В.

Допустимая максимальная мощность

$$P_{к\max\ доп} \geq I_{кп} U_{кэп},$$

где

$$I_{кп} = \frac{(U_{п} - U_{к})}{R_k}.$$

Полагаем

$$U_{к} = \frac{U_{п}}{2};$$

$$I_{кп} = \frac{25 \text{ В} - \frac{25 \text{ В}}{2}}{1200 \text{ Ом}} = 0,010 \text{ А};$$

$$P_{к\max\ доп} \geq I_{кп} \cdot U_{кэп} = 0,010 \text{ А} \cdot 12,5 \text{ В} = 0,125 \text{ Вт}.$$

$$I_{к\max\ доп} \geq \frac{U_{п}}{R_k},$$

$$I_{к\max\ доп} \geq \frac{25 \text{ В}}{1200 \text{ Ом}} = 0,021 \text{ А}.$$

Рабочая частота транзистора $f_p > 40$ кГц.

По рассчитанным значениям:

- 1) $I_{K_{\max \text{ доп}}} = 21 \text{ мА}$; 2) $P_{K_{\max \text{ доп}}} = 125 \text{ мВт}$;
 3) $I_{K_{\text{кп}}} = 10 \text{ мА}$; 4) $f_p > 40 \text{ кГц}$

из справочника по полупроводниковым приборам (транзисторам малой мощности) выбираем транзистор *n-p-n* КТ315А со следующими параметрами:

$$P_{K_{\max \text{ доп}}} = 150 \text{ мВт}; \quad f_{\text{тр}} = 250 \text{ МГц}; \quad U_{KЭ} = 25 \text{ В}; \quad I_{K_{\max}} = 100 \text{ мА}; \quad I_{K_{\text{б0}}}, I_{K_{\text{к0}}} = 0,5 \text{ мкА}; \quad h_{21э} = 30 \dots 120.$$

Рассчитываем значение резистора. Полагаем, что $R_3 = (0,1 \dots 0,5) R_K$; тогда выбираем $R_3 = 0,25 \cdot 1,2 \text{ кОм} = 0,3 \text{ кОм}$.

Для определения рабочей точки транзистора и уточнения значений тока и напряжения покоя на статических входных и выходных характеристиках биполярного транзистора с ОЭ (рис. 9.2 и 9.3) строим нагрузочную прямую на выходных характеристиках $I_K = f(U_{KЭ})$.

Нагрузочная прямая на выходных характеристиках строится в режимах холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ). Для выходной цепи транзистора (коллектор-эмиттер) по второму закону Кирхгофа

$$U_{\text{п}} = I_K R_K + U_{KЭ}.$$

В режиме ХХ $I_K = 0$, при этом $U_{KЭ} = U_{\text{п}} = 25 \text{ В}$.

В режиме КЗ $U_{KЭ} = 0$, при этом $I_K = \frac{U_{\text{п}}}{R_K} = \frac{25 \text{ В}}{1200 \text{ Ом}} = 0,021 \text{ А}$.

На выходных характеристиках откладываем точку *E*, соответствующую режиму ХХ, и точку *D*, соответствующую режиму КЗ. Через точки *D* и *E* проводим нагрузочную прямую, на которой отмечаем точку покоя *A* по координате тока коллектора покоя $I_{K_{\text{п}}}$.

Для определения $I_{K_{\text{п}}}$ откладываем $I_{K_{\text{мин}}}$ соответствующий $I_{\text{б мин}}$. $I_{K_{\text{макс}}}$ соответствует точка пересечения нагрузочной прямой *DE* и штриховой линии *OC*, отделяющей на выходных характеристиках режим насыщения (точка *B*).

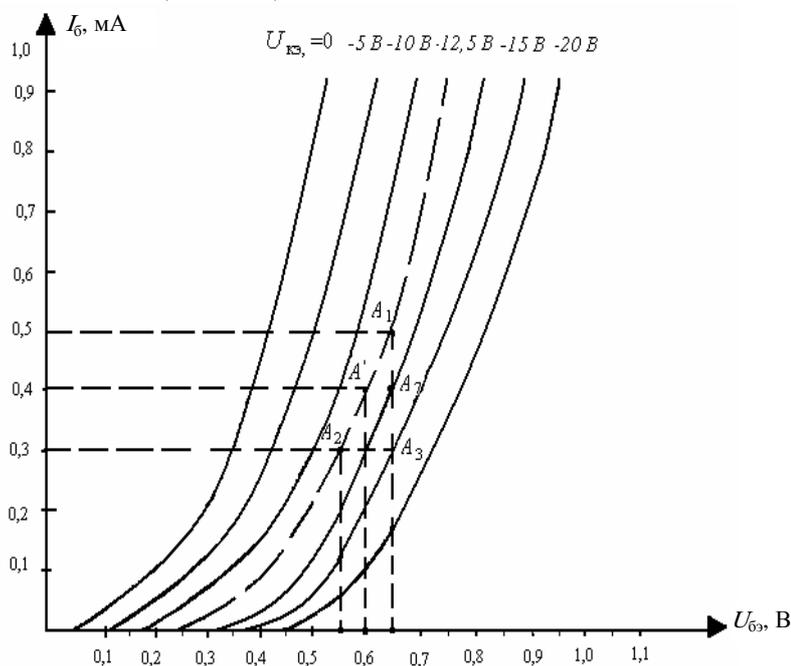


Рис. 9.2. Статические входные характеристики биполярного транзистора КТ315 А с ОЭ $I_b = f(U_{бэ})$

$I_{K_{\text{п}}}$ определяется по формуле

$$I_{K_{\text{эп}}} = \frac{I_{K_{\text{мин}}} + I_{K_{\text{макс}}}}{2}; \quad I_{K_{\text{п}}} = \frac{2 \text{ мА} + 18 \text{ мА}}{2} = 10 \text{ мА}.$$

Рабочей точке *A* соответствует напряжение $U_{KЭп} = 12,5 \text{ В}$.

Мощность рассеяния на коллекторе

$$P_k = U_{кэп} \cdot I_{кп} = 12,5 \text{ В} \cdot 0,010 \text{ А} = 125 \text{ мВт}.$$

Согласно справочным данным, для выбранного транзистора КТ315А режим работы транзистора по мощности рассеяния допустим. Если этот режим не выполняется, то следует увеличить P_k или уменьшить $U_{п}$.

Выполняется расчёт h -параметров транзистора по характеристическим треугольникам в области рабочей точки A – на выходных характеристиках и в области рабочей точки A' – на входных характеристиках. На входные характеристики рабочую точку A переносим по значениям тока базы $I_{б} = 0,4 \text{ мА}$ и напряжению $U_{кэп} = 12,5 \text{ В}$.

Для построения характеристического треугольника на равных расстояниях от точки A на входных характеристиках откладываются отрезки и обозначаются точки A_1 и A_2 , из которых опускаются перпендикуляры на оси $I_{б}$ и $U_{бэ}$.

Входное сопротивление транзистора

$$h_{11э} = \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_{б}} \right|_{U_{к} = \text{const}} = \frac{0,1 \text{ В}}{0,2 \cdot 10^{-3} \text{ А}} = 0,5 \text{ кОм}.$$

Выходная проходимость рассчитывается по отношению приращений $\Delta I_{к}$ и $\Delta U_{кэ}$, которые определяются из построенного характеристического треугольника в области рабочей точки на выходных характеристиках A_4 A_5 A_6 :

$$h_{22э} = \left. \frac{\Delta I_{к}}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_{б} = \text{const}} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{3 \text{ В}} = 1,7 \text{ мкСм}.$$

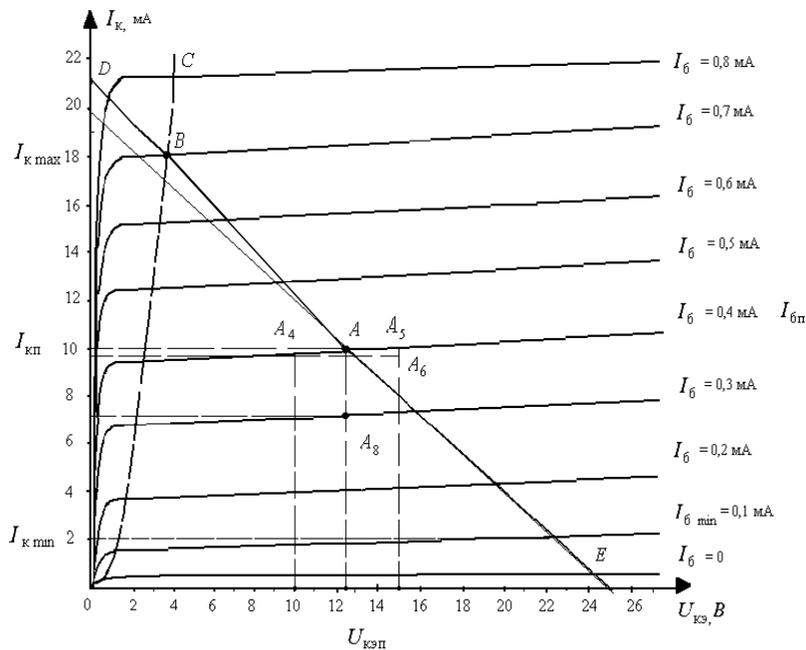


Рис. 9.3. Статические выходные характеристики биполярного транзистора КТ315 с ОЭ $I_{к} = f(U_{кэ})$

Коэффициент обратной связи по напряжению $h_{12э}$ определяется по входным характеристикам при постоянном токе базы для точек A' и A_7 :

$$\begin{aligned} \Delta U_{кэ} &= 15 \text{ В} - 12,5 \text{ В} = 2,5 \text{ В}; \\ \Delta U_{бэ} &= 0,05 \text{ В}; \\ h_{12э} &= \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_{б} = \text{const}} = \frac{0,05 \text{ В}}{2,5 \text{ В}} = 0,02. \end{aligned}$$

Коэффициент передачи тока базы транзистора определяется по выходным характеристикам для точек A и A_8 :

$$h_{21э} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_6} \Big|_{U_{кэ} = \text{const}} = \frac{3 \text{ мА}}{0,1 \text{ мА}} = 30.$$

По эквивалентной Т-образной схеме замещения транзистора с ОЭ определяются физические параметры (рис. 9.4) r_6 , r_3 , r_k , β .

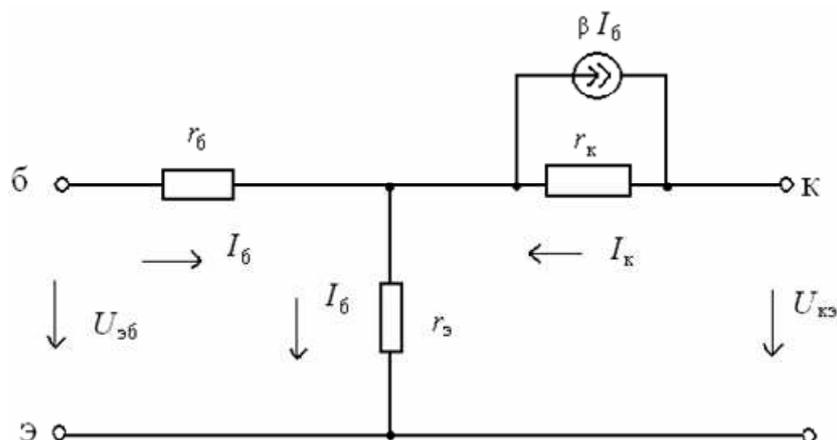


Рис. 9.4. Т-образная схема замещения биполярного транзистора с ОЭ

Коэффициент передачи тока базы

$$\beta \approx h_{21э} \approx 30;$$

$$r_3 = \frac{h_{12э}}{h_{22э}} = \frac{0,024}{1,7 \cdot 10^{-4} \text{ мкСм}} = 117,6 \text{ Ом};$$

$$r_6 = h_{11э} - h_{12э}(1 + h_{21э})/h_{22э} = 500 - 0,02(1 + 30)/1,7 \cdot 10^{-4} = 3,1 \text{ кОм};$$

$$r_k = \frac{h_{21э} + 1}{h_{22э}} = \frac{30 + 1}{1,7 \cdot 10^{-4} \text{ мкСм}} = 182,4 \text{ кОм}.$$

В рассматриваемом усилительном каскаде с ОЭ для стабилизации тока коллектора используется эмиттерная стабилизация. Увеличение тока коллектора, например, при воздействии температуры окружающей среды, приводит к возрастанию тока эмиттера и падению напряжения на резисторе R_3 . Это напряжение (с минусом) подаётся через делитель напряжения R_{61} и R_{62} на базу транзистора, препятствуя возрастанию тока коллектора.

При изменении температуры окружающей среды приращение тока коллектора ΔI_k определяется приращением следующих параметров:

$$\Delta I_k = S \left[\frac{\Delta U_3}{R_3 + R_6} + \frac{\Delta I_{к0}}{h_{21э}} + \frac{h_{21э}(I_{6п} + I_{к0})}{h_{21э}} \right],$$

где S – коэффициент нестабильности тока коллектора I_k ; ΔU_3 – приращение напряжения на эмиттерном переходе; $\Delta h_{21э}$ – приращение коэффициента передачи по току; R_6 – эквивалентное сопротивление базы; $\Delta I_{к0}$ – приращение обратного тока коллектора.

$$S = \frac{h_{21э}}{1 + \gamma h_{21э}},$$

где $\gamma = \frac{R_3}{R_3 + R_6}$ – коэффициент токораспределения в цепи коллектора;

$$R_6 = \frac{R_3}{0,5 \dots 1} = \frac{R_3}{0,75} = \frac{0,3 \text{ кОм}}{0,75} = 0,4 \text{ кОм}.$$

Подставляя полученное значение γ в формулу для определения коэффициента неустойчивости

$$S = \frac{30}{1 + 0,43 \cdot 30} = \frac{30}{13,9} = 2,16,$$

$$\Delta U_3 = E \cdot \Delta T,$$

где E – температурный коэффициент напряжения $U_{бэ}$, для кремниевых транзисторов, согласно справочным данным, $E = 2$ мВ/град.

$$\begin{aligned} \Delta U_3 &= 2 \text{ мВ/град} \cdot (T_{\max} \text{ К} - T_{\min} \text{ К}) = \\ &= 2 \text{ мВ/град} \cdot [(273 + 100) \text{ К} - (273 + 0) \text{ К}] = 200 \text{ мВ} = 0,2 \text{ В}. \end{aligned}$$

Изменение коэффициента передачи тока при изменении температуры определяется по зависимостям из справочных данных. Принимаем $\Delta h_{21э} = 29$.

Приращение обратного тока коллектора при изменении температуры окружающей среды

$$\Delta I_{\text{ко}} = I_{\text{ко}}(T_0) \left(2^{\frac{T_{\max} - T_0}{T^*}} - 2^{\frac{T_{\min} - T_0}{T^*}} \right),$$

где T^* – температура удвоения тока коллектора; T_0 – начальная температура, при которой определялся обратный ток $I_{\text{ко}}$ (0°C).

Обратный ток коллектора для транзистора КТ315 А берётся из справочника: $I_{\text{ко}} = 1$ мкА.

Приращение тока коллектора будет равно

$$\begin{aligned} \Delta I_{\text{ко}} &= 1 \text{ мкА} \left(2^{\frac{373 - 293}{373}} - 2^{\frac{273 - 273}{273}} \right) = 1 \text{ мкА} (2^{0,214} - 2^0) = \\ &= 1 \text{ мкА} (1,16 - 1) = 0,16 \text{ мкА}. \end{aligned}$$

Подставляем рассчитанные значения S , ΔU_3 , R_6 , $\Delta I_{\text{ко}}$, $\Delta h_{21э}$ в формулу для определения приращения $I_{\text{к}}$:

$$\begin{aligned} \Delta I_{\text{к}} &= 2,16 \left[\frac{0,2 \text{ В}}{300 \text{ Ом} + 400 \text{ Ом}} + \frac{0,16 \cdot 10^{-6} \text{ А}}{30} + \frac{29(0,4 \cdot 10^{-3} \text{ А} + 1 \cdot 10^{-6} \text{ А})}{30} \right] = \\ &= 2,16 [0,000286 \text{ А} + 0,53 \cdot 10^{-8} \text{ А} + 0,000387 \text{ А}] = 0,00145 \text{ А} = 1,45 \text{ мА}. \end{aligned}$$

Рассчитываем сопротивления делителя напряжения R_{61} , R_{62} :

$$R_{61} = \frac{E_{\text{к}} \cdot R_6}{I_3 + R_3},$$

где $I_3 = I_6 + I_{\text{к}}$, $I_6 = I_{\text{бп}}$, $I_{\text{к}} = I_{\text{кп}}$, $I_{\text{к}} = I_{\text{кп}}$;

$$I_3 = 0,4 \text{ мА} + 10 \text{ мА} = 10,4 \text{ мА} ;$$

$$R_{61} = \frac{25 \text{ В} \cdot 400 \text{ Ом}}{10,4 \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot 300 \text{ Ом}} = 3205 \text{ Ом} .$$

По шкале номинальных значений сопротивлений принимаем $R_{61} = 3,3 \text{ кОм}$.

Рассчитываем R_{62} по формуле

$$R_{62} = \frac{1}{\frac{1}{R_6} - \frac{1}{R_{61}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,4 \text{ кОм}} - \frac{1}{3,3 \text{ кОм}}} = \frac{1}{2,5 \text{ кОм} - 0,3 \text{ кОм}} = 0,45 \text{ кОм} .$$

Принимаем $R_{62} = 0,470 \text{ кОм}$.

9.2.3. Расчёт усилителя по переменному току

Расчёт по переменному току проводится на основе использования эквивалентной схемы, приведённой на рис. 9.5 усилительного каскада с ОЭ переменного тока.

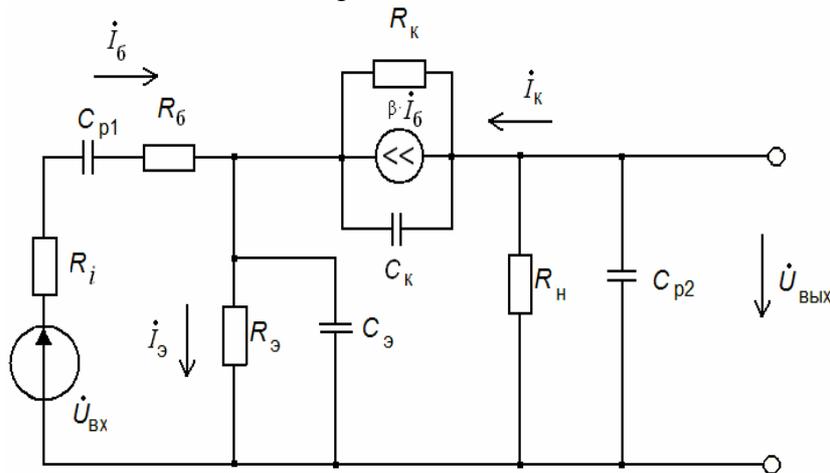


Рис. 9.5. Эквивалентная схема усилительного каскада с ОЭ при переменном токе

Входное сопротивление усилительного каскада для переменной составляющей

$$R_{\text{вх ук}} = R_{61} \parallel R_{62} \parallel R_{\text{вх т}} ,$$

где $R_{\text{вх т}}$ – входное сопротивление транзистора, $R_{\text{вх т}} = h_{113}$.

$$R_{61} \parallel R_{62} = \frac{R_{61} \cdot R_{62}}{R_{61} + R_{62}} = \frac{3,3 \text{ кОм} \cdot 0,47 \text{ кОм}}{3,3 \text{ кОм} + 0,47 \text{ кОм}} = 0,4 \text{ кОм} ;$$

$$R_{\text{вх ук}} = 0,4 \text{ кОм} \parallel h_{113} = 0,4 \text{ кОм} \parallel 0,5 \text{ кОм} = \frac{0,4 \text{ кОм} \cdot 0,5 \text{ кОм}}{0,4 \text{ кОм} + 0,5 \text{ кОм}} = 0,22 \text{ кОм} .$$

Выходное сопротивление усилителя для переменной составляющей

$$R_{\text{вых ук}} = R_k \parallel R_{\text{вых т}} ,$$

где $R_{\text{вых т}} = \frac{1}{h_{223}}$.

$$R_{\text{вых т}} = \frac{R_k \cdot \frac{1}{h_{223}}}{R_k + \frac{1}{h_{223}}} = \frac{1200 \text{ Ом} \cdot \frac{1}{1,7 \cdot 10^{-4} \text{ мкСм}}}{1200 \text{ Ом} + \frac{1}{1,7 \cdot 10^{-4} \text{ мкСм}}} =$$

$$= \frac{1200 \text{ Ом} \cdot 5882,35}{1200 \text{ Ом} + 5882,35} = \frac{7058823,53}{7082,35} = 997 \text{ Ом}.$$

Коэффициент усиления по напряжению каскада при переменном токе

$$K_U = R_H \parallel \frac{R_k}{R_3} = \frac{R_H \cdot \frac{R_k}{R_3}}{R_H + \frac{R_k}{R_3}} = \frac{120 \text{ Ом} \cdot \frac{1200 \text{ Ом}}{300 \text{ Ом}}}{120 \text{ Ом} + \frac{1200 \text{ Ом}}{300 \text{ Ом}}} = \frac{480 \text{ Ом}}{124 \text{ Ом}} = 3,9.$$

Коэффициент усиления каскада по току

$$R_{I_{\text{ук}}} = \frac{h_{213}}{1 + h_{223} \cdot R_k} = \frac{30}{1 + 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ мкСм}} = 29,9.$$

Коэффициент усиления каскада по мощности

$$K_{P_{\text{ук}}} = K_{I_{\text{ук}}} \cdot K_U = 29,9 \cdot 3,9 = 116,6.$$

Ёмкость разделительного конденсатора C_{p1} определяется по следующей зависимости:

$$C_{p1} = \frac{\tau}{R_i + R_{\text{вх ук}}},$$

где $\tau = \frac{1}{\omega_H \sqrt{M_H^2 - 1}}$;

$$C_{p1} = \frac{1}{\omega_H \sqrt{M_H^2 - 1} (R_i + R_{\text{вх ук}})} = \frac{1}{2\pi f_H \sqrt{M_H^2 - 1} (R_i + R_{\text{вх ук}})} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \sqrt{1,1^2 - 1} (1000 + 400)} =$$

$$= \frac{1}{62,8 \sqrt{0,21} \cdot 1400} = \frac{1}{28,89 \cdot 1400} = \frac{0,035}{1400} = 0,000025 \text{ Ф} = 25 \text{ мкФ}.$$

Ёмкость конденсатора C_{p2} определяется следующим образом:

$$C_{p2} = \frac{1}{2\pi f_H \sqrt{M_H^2 - 1} (R_H + R_k)} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \sqrt{1,1^2 - 1} (120 + 1200)} =$$

$$= \frac{0,035}{1320} = 0,000027 \text{ Ф} = 27 \text{ мкФ}.$$

По шкале номинальных значений принимаем 25 мкФ.

Рассчитываем ёмкость конденсатора

$$C_3 = \frac{1}{R_3 \parallel \left(r_3 + \frac{(r_3 + R_6 \parallel R_i)}{h_{213} + 1} \right)},$$

где $R_6 = R_{61} \parallel R_{62}$;

$$C_3 = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \sqrt{1,1^2 - 1}} = \frac{0,035}{300 \parallel \left(117,6 + \frac{117,6 + 400 \parallel 1000}{30 + 1} \right)} = \frac{0,035}{300 \parallel \left(117,6 + \frac{117,6 + 285,7}{31} \right)} = \frac{0,035}{300 \parallel 130,6} = \frac{0,035}{91} = 0,000385 \text{ Ф.}$$

Принимаем $C_3 = 0,000350 \text{ Ф.}$

Верхняя предельная частота транзистора КТ315 А определяется по следующей зависимости:

$$f_B = \frac{\omega_B}{2\pi},$$

$$\text{где } \omega_B = \frac{1 + h_{21э} K_6 \sqrt{M_H^2 - 1}}{\tau_{квч}},$$

где K_6 – коэффициент в цепи отрицательной обратной связи, учитывающий ответвление тока коллектора в базу; $\tau_{квч}$ – постоянная времени, учитывающая нарастание тока коллектора на высокой частоте;

$$K_6 = \frac{r_3}{r_3 + r_3 + R_i^*},$$

$$\text{где } R_i^* = R_i \parallel R_6 = \frac{R_i \cdot R_6}{R_i + R_6} = \frac{1000 \text{ Ом} \cdot 400 \text{ Ом}}{1000 \text{ Ом} + 400 \text{ Ом}} = 285,7 \text{ Ом};$$

$$K_6 = \frac{117,6 \text{ Ом}}{117,6 \text{ Ом} + 3100 \text{ Ом} + 285,7 \text{ Ом}} = 0,034.$$

$$\tau_{квч} = h_{21э} \cdot (R_H \parallel R_K) \cdot C_K + \tau_K,$$

где τ_K – постоянная времени цепи обратной связи на предельной частоте для транзистора КТ315 А, значение которой указано в справочнике по полупроводниковым приборам (транзисторам), $\tau_K = 300 \text{ пс}$; C_K – емкость коллекторного перехода (справочные данные), $C_K = 7 \text{ пФ}$.

Рассчитываем

$$\begin{aligned} \tau_{квч} &= 30 \cdot (120 \text{ Ом} \parallel 1200 \text{ Ом}) \cdot 7 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} + 300 \cdot 10^{-12} \text{ с} = \\ &= 30 \cdot \frac{120 \text{ Ом} \cdot 1200 \text{ Ом}}{120 \text{ Ом} + 1200 \text{ Ом}} \cdot 7 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} + 300 \cdot 10^{-12} \text{ с} = \\ &= 3272,73 \cdot 7 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} + 300 \cdot 10^{-12} \text{ с} = 2,32 \cdot 10^{-8} \text{ с}. \end{aligned}$$

Подставляем полученные значения K_6 и $\tau_{квч}$ в формулу для определения ω_B :

$$\omega_B = \frac{1 + 30 \cdot 0,034 \cdot \sqrt{1,3^2 - 1}}{2,32 \cdot 10^{-8} \text{ с}} = \frac{1,847}{2,32 \cdot 10^{-8} \text{ с}} = 0,8 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{с}};$$

$$f_B = \frac{\omega_B}{2\pi} = \frac{0,8 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{с}}}{2 \cdot 3,14} = 12,7 \text{ МГц.}$$

Принципиальная электрическая схема с указанием рассчитанных номиналов элементов приведена на рис. 9.6.

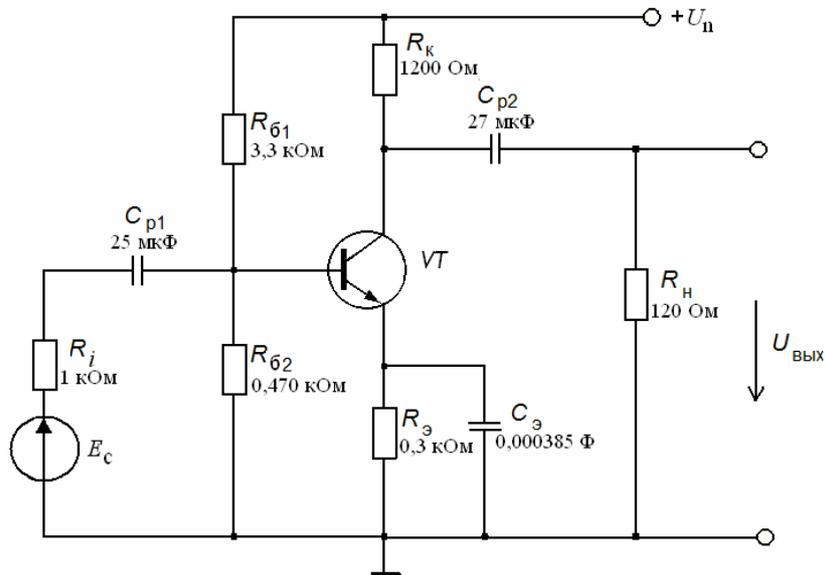


Рис. 9.6. Принципиальная электрическая схема усилителя с рассчитанными значениями номиналов элементов

9.2.4. Построение частотных характеристик усилителя

Для построения частотных характеристик усилителя – логарифмической амплитудно-частотной и фазочастотной составляется схема замещения усилителя, которая представлена на рис. 9.7.

Для того чтобы расчёт и построение частотных характеристик упростились, следует схему замещения представить двумя схемами замещения, которые содержат по одному конденсатору. Тогда передаточные функции для этих схем замещения будут первого порядка, так как схемы описываются дифференциальными уравнениями, связывающими входные и выходные сигналы схемы, первого порядка.

Представим схему замещения усилителя, приведённую на рис. 9.7, двумя схемами замещения, содержащими по одному реактивному элементу (конденсатору) (рис. 9.8).

На схемах замещения рис. 9.8 назначение элементов R_i , R_{β} , $R_{вхТ}$ уже приведено в данном пособии и их значения рассчитаны.

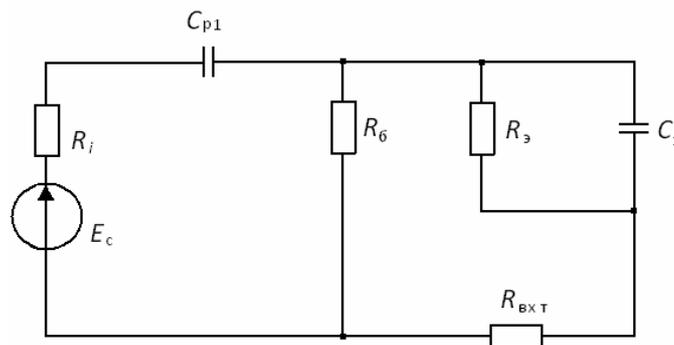
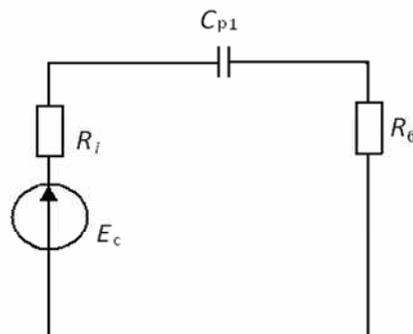


Рис. 9.7. Схема замещения усилителя



a)

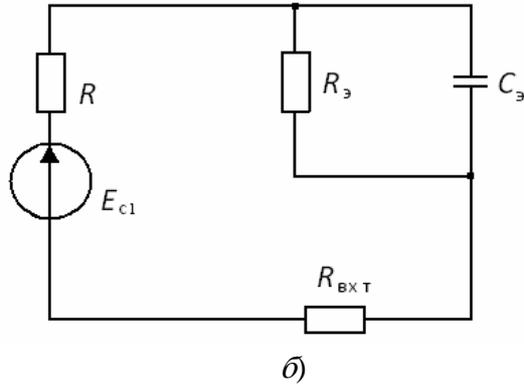


Рис. 9.8. Схемы замещения усилительного каскада:

a – схема замещения 1; *б* – схема замещения 2

Сопротивление R на рис. 9.8, *б* соответствует выходному сопротивлению схемы, представленной на рис. 9.8, *a*.

Приближённо значение сопротивления R можно определить по следующему соотношению:

$$R = R_i \parallel R_6 = \frac{R_i \cdot R_6}{R_i + R_6} = \frac{1 \text{ кОм} \cdot 0,4 \text{ кОм}}{1 \text{ кОм} + 0,4 \text{ кОм}} = 0,29 \text{ кОм}.$$

Для составленных схем замещения усилительного каскада передаточные функции записываются следующим образом. Передаточная функция для схемы на рис. 9.8, *a* будет определяться по известному выражению для соответствующей RC-цепи

$$K_1(p) = \frac{T_1 p}{T_2 p + 1},$$

где T_1 , T_2 – постоянные времени, определяемые по формулам:

$$T_1 = (R_6 + R_i) C_{p1}; \quad T_2 = R_6 C_{p1}.$$

Передаточная функция для схемы на рис. 9.8, *б* имеет вид для известной элементарной RC-цепи

$$K_2(p) = \frac{K_0 (T_3 p + 1)}{T_4 p + 1},$$

где T_3 , T_4 – постоянные времени, которые рассчитываются по формулам:

$$T_3 = R_3 C_3; \quad T_4 = \frac{(R_{\text{вх т}} + R) R_3 C_3}{R_{\text{вх т}} + R + R_3};$$

$$K_0 = \frac{R_{\text{вх т}}}{R_{\text{вх т}} + R + R_3}.$$

Определим постоянные времени T_1 , T_2 , T_3 , T_4 RC-цепи в передаточных функциях $K_1(p)$ и $K_2(p)$:

$$T_1 = R_6 \cdot C_{p1} = 400 \text{ Ом} \cdot 0,000025 \text{ Ф} = 0,01 \text{ с};$$

$$T_2 = (R_6 + R_i) C_{p1} = (400 \text{ Ом} + 1000 \text{ Ом}) 0,000025 \text{ Ф} = 0,035 \text{ с};$$

$$T_3 = R_3 \cdot C_3 = 300 \text{ Ом} \cdot 0,000350 \text{ Ф} = 0,105 \text{ с};$$

$$T_4 = \frac{(R_{\text{вхТ}} + R)R_3 \cdot C_3}{R_{\text{вхТ}} + R + R_3} = \frac{(500 \text{ Ом} + 290 \text{ Ом})300 \text{ Ом} \cdot 0,000350 \text{ Ф}}{500 \text{ Ом} + 290 \text{ Ом} + 300 \text{ Ом}} = 0,076 \text{ с}.$$

$$K_0 = \frac{R_{\text{вхТ}}}{R_{\text{вхТ}} + R + R_3} = \frac{0,5 \text{ кОм}}{0,5 \text{ кОм} + 0,29 \text{ кОм} + 0,3 \text{ кОм}} = 0,459.$$

Подставляем полученные значения T_1 , T_2 в передаточную функцию $K_1(p)$ и преобразуем её к виду

$$K(p) = B(\omega) + jC(\omega),$$

где $B(\omega)$ и $jC(\omega)$ – действительная и мнимая части комплексного числа, представляющего собой преобразованную передаточную функцию $K_1(p)$:

$$\begin{aligned} K_1(p) &= \frac{T_1 p}{T_2 p + 1} = \frac{T_1 p(T_2 p - 1)}{(T_2 p + 1)(T_2 p - 1)} = \frac{T_1 T_2 p^2 - T_1 p}{T_2^2 p^2 + T_2 p - T_2 p - 1} = \\ &= \frac{T_1 T_2^2 p^2 - T_1 p}{T_2^2 p^2 - 1} = \frac{T_1 T_2^2 j^2 \omega^2 - T_1 j \omega}{T_2^2 j^2 \omega^2 - 1} = \frac{T_1 T_2^2 (-1) \omega^2 - T_1 j \omega}{T_2^2 (-1) \omega^2 - 1} = \\ &= \frac{-T_1 T_2^2 \omega^2 - T_1 j \omega}{-T_2^2 \omega^2 - 1} = \frac{T_1 T_2^2 \omega^2}{T_2^2 \omega^2 + 1} + j \frac{T_1 \omega}{T_2^2 \omega^2 + 1} = \frac{\omega (T_1 T_2^2 \omega)}{\omega \left(T_2^2 \omega + \frac{1}{\omega} \right)} + \\ &+ j \frac{T_1 \omega}{\omega \left(T_2^2 \omega + \frac{1}{\omega} \right)} = \frac{T_1 T_2^2 \omega}{T_2^2 \omega + \frac{1}{\omega}} + j \frac{T_1}{T_2^2 \omega + \frac{1}{\omega}}. \end{aligned}$$

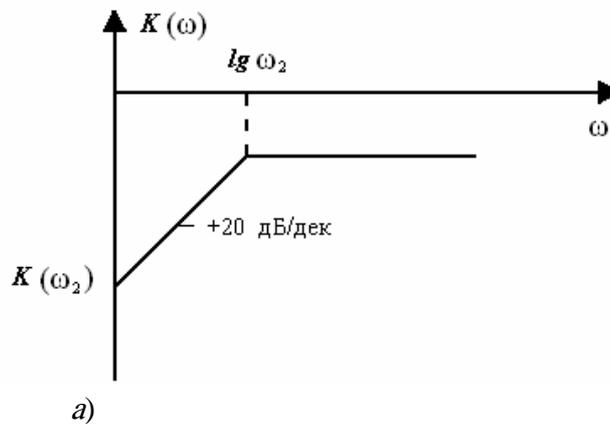
Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) имеет следующий вид:

$$K(\omega) = 20 \lg [K(\omega)] = 20 \lg \sqrt{B^2(\omega) + C^2(\omega)}.$$

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) записывается следующим образом:

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{C(\omega)}{B(\omega)}.$$

Общий вид логарифмических амплитудно-частотных характеристик для известных RC-цепей и передаточных функций для схем замещения на рис. 9.8 представлен на рис. 9.9.



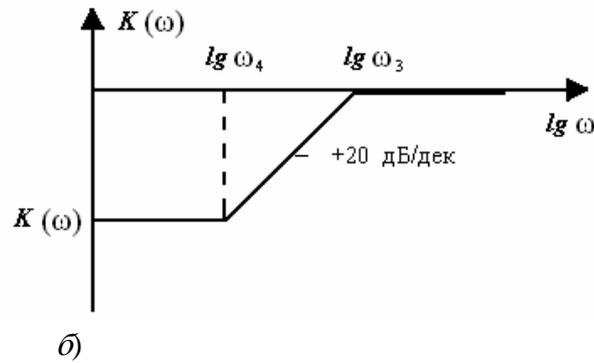


Рис. 9.9. ЛАЧХ известных элементарных RC-цепей:

a – для передаточной функции $K_1(p)$; *б* – ЛАЧХ для передаточной функции $K_2(p)$

При построении ЛАЧХ на рис. 9.9, *a* обеспечивается наклон характеристики +20 дБ/дек до частоты ω_2 , а затем – нулевой наклон. ЛАЧХ на рис. 9.9, *б* имеет нулевой наклон до частоты ω_4 , которая определяется постоянной времени T_4 , а затем наклон характеристики +20 дБ/дек до частоты ω_3 , которая определяется постоянной времени T_3 . Суммарная ЛАЧХ усилительного каскада строится суммированием построенных ЛАЧХ в соответствии с передаточными функциями $K_1(\omega)$ и $K_2(\omega)$.

Подставляем полученные значения мнимой и действительной части передаточной функции $K(p)$ в выражение $K(\omega)$ и $\varphi(\omega)$.

ЛАЧХ для $K_1(p)$ будет иметь следующий вид:

$$K_1(\omega) = 20 \lg \sqrt{B^2(\omega) + C^2(\omega)} = 20 \lg \sqrt{\left(\frac{T_1 T_2 \omega}{T_2^2 \omega + \frac{1}{\omega}} \right)^2 + \left(\frac{T_1}{T_2^2 \omega + \frac{1}{\omega}} \right)^2};$$

$$\varphi_1(\omega) = -\arctg \frac{\frac{T_1}{T_2^2 \omega + \frac{1}{\omega}}}{\frac{T_1 T_2 \omega}{T_2^2 \omega + \frac{1}{\omega}}}.$$

Круговую частоту ω определим для значений постоянных времени T_1, T_2, T_3, T_4 :

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,01} = 100; \lg \omega_1 = \lg 100 = 2;$$

$$\omega_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{0,035} = 28,6; \lg \omega_2 = \lg 28,6 = 1,5;$$

$$\omega_3 = \frac{1}{T_3} = \frac{1}{0,105} = 9,524; \lg \omega_3 = \lg 9,524 = 0,98;$$

$$\omega_4 = \frac{1}{T_4} = \frac{1}{0,076} = 13,2 \lg \omega_4 = \lg 13,2 = 1,1.$$

Подставим ω_2 в передаточную функцию $K_1(\omega)$:

$$\begin{aligned} K_1(\omega_2) &= 20 \lg \sqrt{\left(\frac{T_1 T_2 \cdot \frac{1}{T_2}}{T_2^2 \cdot \frac{1}{T_2} + \frac{1}{\frac{1}{T_2}}} \right)^2 + \left(\frac{T_1}{T_2^2 \cdot \frac{1}{T_2} + \frac{1}{\frac{1}{T_2}}} \right)^2} = \\ &= 20 \lg \sqrt{\left(\frac{T_1}{T_2 + T_2} \right)^2 + \left(\frac{T_1}{T_2 + T_2} \right)^2} = 20 \lg \sqrt{\left(\frac{T_1}{2T_2} \right)^2 + \left(\frac{T_1}{2T_2} \right)^2} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 20 \lg \sqrt{2 \left(\frac{T_1}{2T_2} \right)^2} = 20 \lg \sqrt{2 \left(\frac{0,01}{2 \cdot 0,035} \right)^2} = 20 \lg \sqrt{0,0408} = \\
&= 20 \lg 0,202 = 20 \cdot (-0,6945) = -13,9.
\end{aligned}$$

Преобразуем передаточную функцию для схемы на рис. 9.8, б

$$\begin{aligned}
K_2(p) &= \frac{K_0(T_3 p + 1)}{T_4 p + 1} = \frac{K_0(T_3 p + 1)(T_4 p - 1)}{(T_4 p + 1)(T_4 p - 1)} = \\
&= \frac{K_0(T_3 T_4 p^2 + T_4 p - T_3 p - 1)}{(T_4^2 p^2 + T_4 p - T_4 p - 1)} = \frac{K_0(T_3 T_4 p^2 - 1) + K_0(T_4 p - T_3 p)}{T_4^2 p^2 - 1} = \\
&= \frac{K_0(T_3 T_4 p^2 - 1)}{T_4^2 p^2 - 1} + \frac{K_0(T_4 p - T_3 p)}{T_4^2 p^2 - 1} = \frac{K_0(T_3 T_4 (-1)\omega^2 - 1)}{T_4^2 (-1)\omega^2 - 1} + \\
&+ j \frac{K_0(T_4 \omega - T_3 \omega)}{T_4^2 (-1)\omega^2 - 1} = \frac{K_0(T_3 T_4 \omega^2 + 1)}{T_4^2 \omega^2 + 1} + j \frac{K_0(T_4 \omega - T_3 \omega)}{T_4^2 (-1)\omega^2 - 1}.
\end{aligned}$$

ЛАЧХ на основе передаточной функции $K_2(p)$ будет иметь следующий вид:

$$K_2(\omega) = 20 \lg \sqrt{\left[\frac{K_0(T_3 T_4 \omega^2 + 1)}{T_4^2 \omega^2 + 1} \right]^2 + \left[\frac{K_0(T_4 \omega - T_3 \omega)}{T_4^2 (-1)\omega^2 - 1} \right]^2}.$$

В качестве примера построим ЛАЧХ на основе передаточной функции $K_1(\omega_2)$ и известной ЛАЧХ для RC-цепи, схема замещения которой приведена на рис.9.9, а. График построенной ЛАЧХ показан на рис. 9.10.

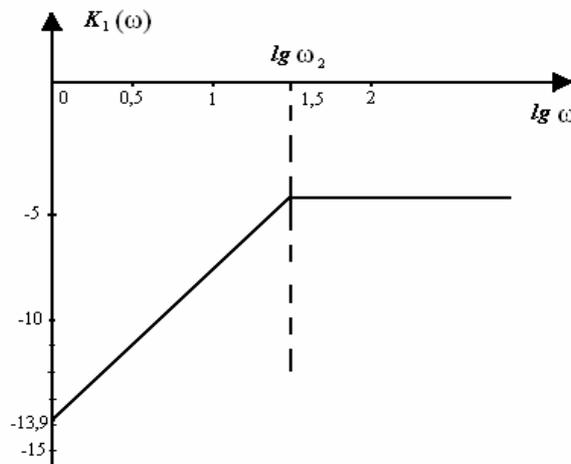


Рис. 9.10. ЛАЧХ RC-цепи усилителя с ОЭ
(по схеме замещения на рис. 9.9, а)

Построим фазочастотную характеристику усилителя с ОЭ.

Согласно передаточной функции для схемы замещения на рис.9.8, а $K_1(p)$ ФЧХ определяется следующим образом:

$$\varphi_1(\omega) = -\arctg \frac{\frac{T_1}{T_2^2 \omega + \frac{1}{\omega}}}{\frac{T_1 \cdot T_2 \omega}{T_2^2 \omega + \frac{1}{\omega}}} = -\arctg \frac{T_1(T_2^2 \omega + \frac{1}{\omega})}{(T_2^2 \omega + \frac{1}{\omega})(T_1 \cdot T_2 \omega)} = -\arctg \frac{1}{T_2 \omega}.$$

В соответствии с передаточной функцией $K_2(p)$ для схемы замещения на рис. 9.8, б ФЧХ будет иметь следующее выражение:

$$\begin{aligned}\varphi_2(\omega) &= -\arctg \frac{K_0(T_4\omega - T_3\omega)}{-T_4^2\omega^2 - 1} = -\arctg \frac{K_0(T_4\omega - T_3\omega)(T_4^2\omega^2 + 1)}{-(T_4^2\omega^2 + 1)K_0(T_3T_4\omega^2 + 1)} = \\ &= -\arctg \frac{T_4\omega - T_3\omega}{-(T_3T_4\omega^2 + 1)} = -\arctg \frac{\omega(T_4 - T_3)}{-\omega(T_3T_4\omega + \frac{1}{\omega})} = -\arctg \frac{T_3 - T_4}{T_3T_4\omega + \frac{1}{\omega}}.\end{aligned}$$

Фазочастотная характеристика строится в соответствии с полученными зависимостями $\varphi_1(\omega)$ и $\varphi_2(\omega)$, а затем суммируются для получения общей ФЧХ усилительного каскада с ОЭ.

9.2.5. Оценка искажений усилителя

Нелинейные искажения в усилителе появляются по следующим основным причинам: из-за наличия в схеме усилителя элементов с нелинейными вольтамперными характеристиками (входными и выходными), нестабильности внутреннего сопротивления источника входного сигнала и сопротивления нагрузки. Значительные искажения в усилитель вносят нестабильность источника питания и изменение температуры окружающей среды.

При оценке искажений в усилителе можно определить коэффициент шума усилителя при нормальных условиях эксплуатации для средних частот по следующему выражению:

$$K_{ш} = 1 + \frac{r_6^*}{R_i^*} + (R_i^* + r_6^*) \frac{(1 - h_{216}) I_3}{2} \cdot \varphi_T R_i^*,$$

где $r_6^* = \frac{\tau_k}{C_k}$ (τ_k , C_k – справочные данные для транзистора КТ315 А); φ_T – температурный потенциал $p-n$

перехода при нормальных условиях эксплуатации $\varphi_T = 26$ мВ, $h_{216} = \frac{\beta}{\beta + 1} = \frac{30}{31} = 0,97$.

Рассчитываем $K_{ш}$:

$$\begin{aligned}K_{ш} &= 1 + \frac{300 \cdot 10^{-12} \text{ с}}{7 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}} / 285,7 \text{ Ом} + \left(285,7 \text{ Ом} + \frac{300 \cdot 10^{-12} \text{ с}}{7 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}} \right) \cdot \\ &\cdot \frac{(1 - 0,97) \cdot 10,4 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{2} \cdot 0,026 \text{ В} \cdot 285,7 \text{ Ом} = 1,53.\end{aligned}$$

Для уменьшения нелинейных искажений следует применить стабилизированные источники питания и схемы для стабилизации рабочей точки усилителя – термостабилизации и термокомпенсации.

Курсовое проектирование по расчёту и анализу усилительных устройств, построению частотных характеристик рекомендуется проводить с использованием программы Electronics Workbench для моделирования и анализа электронных компонентов и электрических схем.

10. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Вариант задания на курсовое проектирование определяется двумя последними цифрами номера зачётной книжки студента.

Исходные данные вариантов заданий для расчёта и анализа усилительного каскада с общим эмиттером, схема которого представлена на рис. 9.1 приведены в табл. 10.1.

10.1. Исходные данные вариантов заданий для расчёта усилителя

Вариант	$U_{п}, В$	$R_{н}, Ом$	$f_{н}, Гц$	$M_{н}$	$M_{в}$	$R_{i}, Ом$	$t_{min}, °C$	$t_{max}, °C$
1	25	119	11	1,0	1,2	900	0	110
2	25	117	10	1,2	1,4	900	0	90
3	25	120	9	1,1	1,3	1200	0	120
4	25	118	12	1,1	1,3	1100	0	100
5	25	120	13	1,0	1,2	1000	0	130
6	25	121	8	1,2	1,4	1100	0	120
7	25	117	9	1,0	1,2	900	0	90
8	25	119	11	1,0	1,2	1000	0	110
9	25	120	12	1,1	1,3	900	0	100
10	25	119	10	1,2	1,4	1200	0	120
11	25	118	12	1,0	1,2	900	0	90
12	25	117	13	1,2	1,4	1100	0	100
13	25	121	8	1,1	1,3	1200	0	110
14	25	122	9	1,1	1,3	1000	0	120
15	25	119	11	1,0	1,2	1100	0	130
16	25	120	10	1,2	1,4	1200	0	100
17	25	117	12	1,0	1,2	1000	0	110
18	25	118	13	1,0	1,2	900	0	120

Продолжение табл. 10.1

Вариант	$U_{п}, В$	$R_{н}, Ом$	$f_{н}, Гц$	$M_{н}$	$M_{в}$	$R_{i}, Ом$	$t_{min}, °C$	$t_{max}, °C$
19	25	122	8	1,1	1,3	1200	0	90
20	25	119	9	1,2	1,4	1200	0	90
21	25	120	11	1,0	1,2	1100	0	110
22	25	121	10	1,1	1,3	900	0	110
23	25	118	13	1,2	1,4	1000	0	100
24	25	119	11	1,0	1,2	1100	0	100
25	25	117	12	1,2	1,4	900	0	90

26	25	120	8	1,1	1,3	1200	0	120
27	25	121	9	1,0	1,2	1000	0	130
28	25	118	10	1,1	1,3	900	0	90
29	25	119	11	1,2	1,4	1100	0	100
30	25	117	10	1,0	1,2	900	0	110

При выполнении курсового проекта и проектировании усилителя следует использовать для моделирования электронных компонентов и усилительного каскада, анализа схемы и построения частотных характеристик программу Electronics Workbench.

11. ПОРЯДОК ЗАЩИТЫ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Студенты обязаны защитить курсовой проект не позднее даты защиты, указанной в задании на курсовое проектирование.

Защита курсового проекта по общей электротехнике и электронике осуществляется в следующем порядке:

1. При сдаче курсового проекта студенты должны поставить в штампах на листах пояснительной записки и в чертежах дату выполнения и личную подпись.

2. Материалы курсового проекта (пояснительная записка и чертёжно-графическая часть) сдаются преподавателю в папке с этикеткой (по стандарту СТП ТГТУ 07–97) за неделю до даты защиты.

3. После проверки курсового проекта преподаватель пишет замечания, рецензию и при необходимости возвращает студенту на доработку.

4. Если курсовой проект выполнен не в соответствии с индивидуальным заданием на проектирование, то студенту выдаётся новое задание.

5. К защите студенты допускаются при исправлении курсового проекта в соответствии с замечаниями преподавателя.

6. Защита проекта проводится в назначенную дату в присутствии членов комиссии от кафедры и студентов группы.

7. Процедура защиты включает доклад студента и ответы на вопросы присутствующих на защите. Продолжительность доклада составляет 5–7 минут. В докладе студент должен назвать тему курсового проекта, исходные данные для проектирования, рассказать о разрабатываемой принципиальной электрической схеме усилителя, его достоинствах и недостатках, методике расчёта и анализа частотных свойств, разработки конструкции макета усилителя; рассказать о методике настройки и регулировки, проведения экспериментальных исследований усилителей и метрологического анализа полученных результатов экспериментальных данных выходных параметров усилителя; изложить своё мнение о направлениях совершенствования усилителя.

8. По результатам содержания доклада о выполненном проекте и ответов на вопросы комиссия принимает решение об оценке курсового проекта. В случае неудовлетворительной оценки комиссия назначает новую дату защиты.

9. После успешной защиты курсового проекта материалы проекта сдаются студентом в архив кафедры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии по курсовому проектированию по дисциплине «Общая электротехника и электроника» приведены структура типового курсового проекта и пример расчёта и анализа усилительного каскада на биполярном транзисторе.

Изложены краткие теоретические сведения об устройстве, принципе действия, параметрах и характеристиках полупроводниковых приборов и усилительных каскадов на их основе. Более подробно с тео-

рией и разработкой конструкции усилительных устройств студенты могут ознакомиться в рекомендуемой учебной и справочной литературе.

С практической точки зрения и в порядке закрепления изученного теоретического материала при курсовом проектировании рекомендуется создать макет конструкции усилителя с применением новой элементной базы, провести его настройку и регулировку. После проведения экспериментальных исследований выходных параметров усилителя необходимо провести метрологический анализ полученных результатов измерения. Анализ результатов измерений позволит выявить недостатки усилителя, пути их устранения и рассмотреть направления совершенствования усилительного устройства.

При выполнении курсового проекта следует использовать компьютерные технологии, программные продукты для моделирования, расчёта и анализа электронных компонентов усилителей, например, программу Electronics Workbench.

Оформление текстовой документации пояснительной записки и чертёжно-графической части проекта (титульный лист, перечень элементов, спецификация, печатная плата и др.) должно быть выполнено в соответствии с стандартом предприятия СТП ТГТУ07–97.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баканов, Г.Ф. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств : учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений / Г.Ф. Баканов, С.С. Соколов, В.Ю. Суходольский ; под ред. И.Г. Мироненко. – М. : Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.

2. Схемотехника электронных систем. Аналоговые и импульсные устройства / В.И. Бойко, А.Н. Гуржий, А.А. Зори, В.Я. Жуйков, В.М. Спивак. – СПб. : БХВ–Петербург, 2004. – 496 с.

3. Вайсбурд, Ф.И. Электронные приборы и усилители / Ф.И. Вайсбурд, Г.А. Панаев, Б.Н. Савельев. – 4-е изд., стер. – М. : КомКнига, 2007. – 480 с.

4. Проектирование усилительных устройств на транзисторах : учебное пособие для вузов / Г.В. Войшилло, В.И. Караванов, В.Я. Краева, М.Е. Мовшович, С.А. Новиков. – М. : Связь, 1978. – 184 с.

5. Головатенко-Абрамова, М.П. Задачи по электронике / М.П. Головатенко-Абрамова, А.М. Лапидес. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 112 с.

6. ГОСТ 20406–75. Платы печатные. Термины и определения.

7. Ежков, Ю.А. Справочник по схемотехнике усилителей / Ю.А. Ежков. – 2-е изд. перераб. – М. : ИП РадиоСофт, 2002. – 272 с.

8. Информационно-измерительная техника и электроника : учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Раннев, В.А. Суругина, В.И. Калашников [и др.] ; под ред. Г.Г. Раннева. – М. : Издательский центр «Академия», 2006. – 512 с.

9. Карлашук, В.И. Электронная лаборатория на IBMPC : лабораторный практикум на базе «Electronics Workbench и MATLAB» / В.И. Карлашук. – М. : СОЛОН-Р, 2004. – 799 с.

10. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры : учебник для вузов / К.И. Билибин, А.И. Власов, А.В. Журавлева [и др.]. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 528 с.

11. Лачин, В.И. Электроника : учебное пособие / В.И. Лачин, Н.С. Савёлов. – 6-е изд. перераб. и доп. – Ростов н/Д : Феникс, 2007. – 703 с.

12. Медведев, А.М. Сборка и монтаж электронных устройств / А.М. Медведев. – М. : Техносфера, 2007. – 256 с.

13. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника : учебное пособие / К.К. Ким, Г.Н. Анисимов, В.Ю. Барбарович, Б.Я. Литвинов. – СПб. : Питер. – 368 с.

14. Опадчий, Ю.Ф. Аналоговая и цифровая электроника : учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А. И. Гуров. – М. : Радио и связь, 2002. – 768 с.

15. Остапенко, Г.С. Усилительные устройства : учебное пособие для вузов / Г.С. Остапенко. – М. : Радио и связь, 1989. – 400 с.

16. Пирогова, Е.В. Проектирование и технология печатных плат : учебник для вузов / Е.В. Пирогова. – М. : ИНФРА-М, 2005. – 560 с.

17. Полупроводниковые приборы. Транзисторы малой мощности : справочник / А.А. Зайцев, А.И. Миркин, В.В. Мокряков [и др.] ; под. ред. А.В. Голомедова. – 3-е изд., стер. – М. : КУбКа, 1995. – 340 с.
18. Полупроводниковые приборы. Транзисторы средней и большой мощности : справочник / А.А. Зайцев, А.И. Миркин, В.В. Мокряков [и др.] ; под. ред. А.В. Голомедова. – 3-е изд., стер. – М. : КУбКа, 1995. – 640 с.
19. Прянишников, В.А. Электроника : полный курс лекций / В.А. Прянишников. – 4-е изд. – СПб. : КОРОНА принт, 2004. – 416 с.
20. Ровдо, А.А. Схемотехника усилительных каскадов на биполярных транзисторах / А.А. Ровдо. – М. : Додэка XXI, 2008. – 256 с.
21. Селиванова, З.М. Общая электротехника и электроника : учебное пособие / З.М. Селиванова. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 72 с. – 100экз.
22. Селиванова, З.М. Схемотехника электронных средств : учебное пособие / З.М. Селиванова. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 80 с.
23. Селиванова, З.М. Технология радиоэлектронных средств : лабораторный практикум / З.М. Селиванова, А.П. Петров. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 80 с.
24. Справочник по полупроводниковым приборам / Е.А. Москатов. 2005. – 219 с.
25. Стандарт предприятия. СТП ТГТУ 07–97. Проекты (работы) дипломные и курсовые. Правила оформления / сост. С.Н. Кузнецов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 40 с.
26. Электронные приборы и устройства на их основе : справочная книга / Ю.А. Быстров, С. А. Гамкрелидзе, Е.Б. Иссерлин, В.П. Черепанов. – М. : Ип РадиоСофт, 2002. – 656 с.

Приложение А

ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

<p>Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное агентство по образованию Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «ТАМБОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»</p>	
Кафедра _____	
УТВЕРЖДАЮ	
Зав. кафедрой _____	
подпись, инициалы, фамилия	
« _____ » _____ 20__ г.	
ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА	
к курсовому проекту _____	
наименование учебной дисциплины	
на тему _____	

Автор проекта _____	Группа _____
подпись, дата	инициалы, фамилия
Специальность _____	
номер, наименование	
Обозначение курсового проекта _____	
Руководитель проекта _____	
подпись, дата	инициалы, фамилия
Проект защищён _____	Оценка _____
Члены комиссии _____	
подпись, дата	инициалы, фамилия
подпись, дата	инициалы, фамилия
подпись, дата	инициалы, фамилия
Нормоконтролёр _____	_____
подпись, дата	инициалы, фамилия
Тамбов 20__ г.	

ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Министерство образования и науки Российской Федерации

**Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«ТАМБОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра _____

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой _____

подпись, инициалы, фамилия

« _____ » _____ 20__ г.

**ЗАДАНИЕ № _____
на курсовой проект (работу)**

Студент _____ код _____ группа _____
инициалы, фамилия

1 Тема _____

2 Срок представления проекта к защите

« _____ » _____ 20__ г.

3 Исходные данные для проектирования (научного исследования)

4 Перечень разделов пояснительной записки

4.1 _____

4.2 _____

4.3 _____

4.4 _____

4.5 _____

4.6 _____

4. ... _____

5 Перечень графического материала _____

Руководитель проекта (работы) _____

подпись, дата

инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению _____

подпись, дата

инициалы, фамилия

ВЕДОМОСТЬ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

№	Формат	Обозначение	Наименование	Кол.	№	Примечание
1						
2			Документация общая			
3						
4			Вновь разработанная			
5						
6		ТГТУ.468437.007 ЭЗ	Схема электрическая	1		
7			принципиальная			
8	A1	ТГТУ.468437.007 СБ	Сборочный чертёж	1		
9			печатной платы			
10						
11	A4	ТГТУ.468437.007 ПЗ	Пояснительная записка	38		
12						
13						
14			Документация по деталям			
15						
16			Вновь разработанная			
17						
18	A1	ТГТУ.468437.007	Плата печатная	1		
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
		ТГТУ.468437.007 КП				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		
Разраб.					Лит	Лист
Пров.					у	1
Н. контр.					КРЭМС, гр. Р-21	
Утверд.					Усилительный каскад с общим эмиттером Ведомость курсового проекта	

ПЕРЕЧЕНЬ ЭЛЕМЕНТОВ К ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЕ

Обоз.	Наименование	Кол.	Примечание
<i>Конденсаторы</i>			
C1	K10-17a-H90 0,1 мкФ ОЖО.460.107ТУ	1	
C2	K10-17a-H90 0,068 мкФ ОЖО.460.107ТУ	1	
C3	K52-1Б 220мкФ×25В±20% ОЖО.464.039ТУ	1	
C4	K73-16a 0,22мкФ×250В±20% ОЖО.461.108ТУ	1	
C5	K10-17a-H90 470пФ ОЖО.460.107ТУ	1	
C6	K73-16a 0,22мкФ×250В±20% ОЖО.461.108ТУ	1	
<i>Микросхема</i>			
DA1	K145АП28КО.347.560-01ТУ	1	
<i>Лампа накаливания</i>			
EL1	B220-235-60M ТУ16.675.178-86	1	
<i>Предохранитель</i>			
FU1	ВП1-1 ОЮО.480.003ТУ-Р	1	
<i>Светодиод</i>			
HL1	АЛ102В аА.339.311ТУ	1	
<i>Дроссель</i>			
L1	Д201-274 ОЮО.475.013ТУ	1	
ТГТУ. 648133. 004 ПЭЗ			
Изм/Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.			
Проб.			
Т.Контр			
Н.Контр			
Утв			
Сенсорный регулятор мощности Перечень элементов			Лит. Лист Листов 1 2
			КРЭМС гр. Р-21

Продолжение прил. Г

Обоз.	Наименование	Кол.	Примечание
<u>Резисторы ШКАБ.434110.005ТУ</u>			
R1,R2	C2-33M-0,5 5,1 МОм±20%	2	
R3	C2-33M-0,125 1,2 МОм±20%	1	
R4	C2-33M-0,125 10 КОм±20%	1	
R5	C2-33M-0,125 470 КОм±20%	1	
R6	C2-33M-0,125 1 КОм±20%	1	
R7	C2-33M-0,5 100 Ом±20%	1	
R8	C2-33M-1 1 КОм±20%	1	
R9	C2-33M-0,5 1,2 МОм±20%	1	
R10	C2-33M-0,5 240 Ом±20%	1	
<u>Кнопка</u>			
SB1	КП-1, 1ТВРО.360.002ТУ	1	
<u>Диоды</u>			
VD1,VD2	КС15А СМЗ.362.823ТУ	2	
VD3	КС22А СМЗ.362.823ТУ	1	
VD4,VD5	КД105Б ТРЗ.360.075ТУ	2	
<u>Симистор</u>			
VS1	КЧ208Г ТТ0.343.003ТУ	1	
<u>Транзистор</u>			
VT1	КТ630А ЮФ3.365.043ТУ	1	
ТГТУ. 648133. 004			Лист 2
Изм/Лист N докум. Подп. Дата			

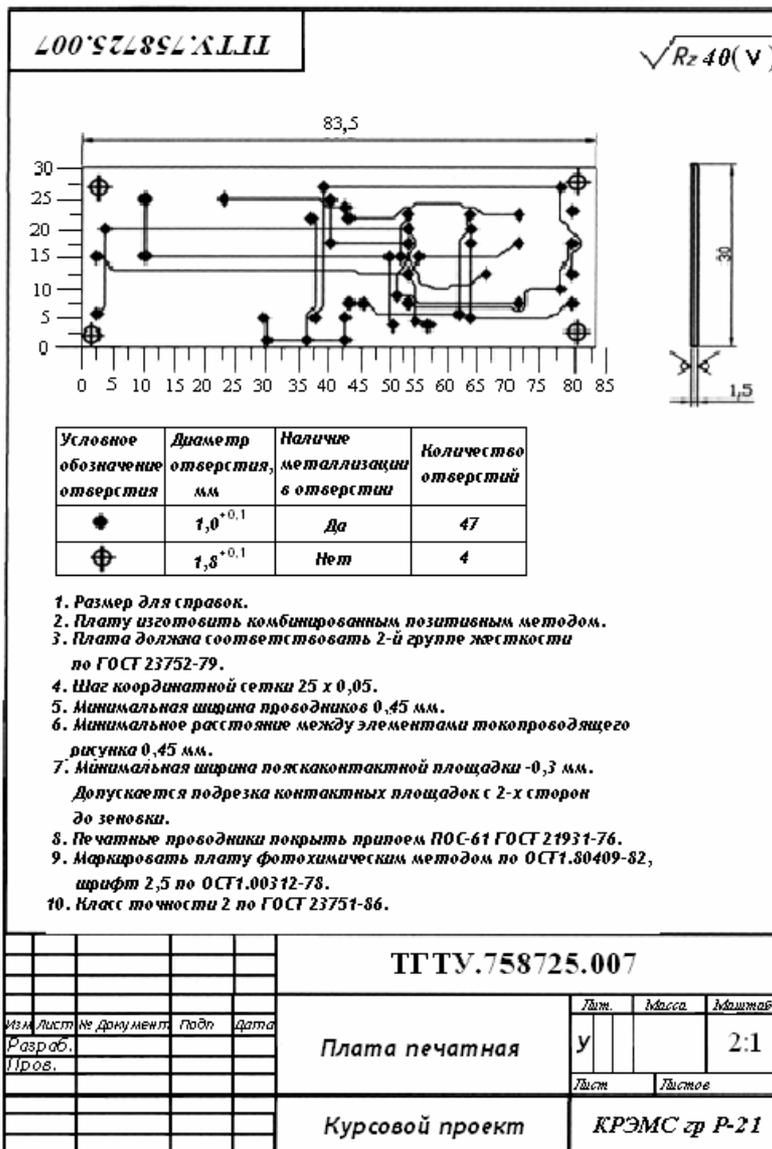
СПЕЦИФИКАЦИЯ

Фирма	Зона	Лист	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
Лист 00000000				Документация		
	АЗ		ТГТУ. 648133. 004 ЭЭ	Схема электрическая принципиальная		
Лист 00000000	АЗ		ТГТУ. 648133. 004 СБ	Сборочный чертёж		
				Детали		
Лист 00000000	АЗ		ТГТУ. 758725. 004	Плата печатная	1	
				Прочие изделия		
Лист 00000000				Диоды		
		1		КД105Б ТР3.360.075ТУ	2	VD4,VD5
Лист 00000000		2		КС515А СМ3.362.823ТУ	2	VD1,VD2
		3		КС522А СМ3.362.823ТУ	1	VD3
Лист 00000000				Дроссель		
		4		Д201-274 ОЮ.475.013ТУ	1	L1
Лист 00000000				Кнопка		
		5		КП-1, 1ТВР0.360.002ТУ	1	SB1
Лист 00000000				Конденсаторы		
				К52-1Б 220мкФ×25В±20%		
Лист 00000000		6		ОЖО.464.039ТУ	1	СЗ
				ТГТУ. 648133. 004		
Лист 00000000	Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
	Разраб.					
Лист 00000000	Проб.					
	Т.Контр					
Лист 00000000	Н.Контр					
	Утв					
				Сенсорный регулятор мощности	Лит.	Лист
					1	3
					КРЭМС гр. Р-21	

Продолжение прил. Д

Формат	Элемент	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание	
Лист: элемент				К10-17а-Н90 0Ж0.460.107ТУ			
		7		К10-17а-Н90 0,1 мкФ	1	С1	
		8		К10-17а-Н90 0,068 мкФ	1	С2	
		9		К10-17а-Н90 470пФ	1	С5	
				К73-16а ±20% 0Ж0.461.108ТУ			
		10		К73-16а 0,22мкФ×250В	2	С4,С6	
	Среды №				<u>Лампа накаливания</u>		
					Б220-235-60М		
			11		ТУ16.675.178-86	1	EL1
					<u>Микросхема</u>		
				К145АП2			
		12		БК0.347.560-01ТУ	1	DA1	
				<u>Предохранитель</u>			
		13		ВП1-1 ОЮ0.480.003ТУ-Р	1	FU1	
				<u>Резисторы</u>			
				С2-33М±20%			
Листы в сборе				ШКАБ.434110.005ТУ			
		14		С2-33М-0,125 1 кОм	1	R6	
		15		С2-33М-0,125 10 кОм	1	R4	
		16		С2-33М-0,125 470кОм	1	R5	
		17		С2-33М-0,125 1,2МОм	1	R3	
		18		С2-33М-0,5 100 Ом	1	R7	
		19		С2-33М-0,5 240 Ом	1	R10	
		20		С2-33М-0,5 1,2 МОм	1	R9	
Листы в сборе		21		С2-33М-0,5 5,1 МОм	2	R1,R2	
		22		С2-33М-1 1 кОм	1	R8	
Итого							
ТГТУ. 648133. 004						Лист	
						2	
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			

ПЕЧАТНАЯ ПЛАТА



- обратный ток эмиттера при $U_{эб} = 5$ В – до 50 мкА;
 - ёмкость коллекторного перехода при $U_{кб} = 10$ В – до 7 пФ.
2. Предельные эксплуатационные данные биполярного транзистора КТ315 А:
- постоянное напряжение $U_{бэ}$ – 6 В;
 - постоянное напряжение $U_{кэ}$ – 25 В;
 - постоянная рассеиваемая мощность – 150 мВт;
 - температура окружающей среды – 60...100 °С

Приложение И

ШКАЛА НОМИНАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЙ РЕЗИСТОРОВ И ЁМКОСТЕЙ КОНДЕНСАТОРОВ

**Таблица И1 – Шкала номинальных значений
сопротивлений резисторов**

Сопротивления резисторов от 1 Ом до 9,1 ГОм		
Ряд Е6, $\Delta = 20\%$	Ряд Е12, $\Delta = 10\%$	Ряд Е24 $\Delta = 5\%$
1,0	1,0	1,0
		1,1
	1,2	1,2
		1,3
1,5	1,5	1,5
		1,6
	1,8	1,8
		2,0
2,2	2,2	2,2
		2,4
	2,7	2,7
		3,0
3,3	3,3	3,3
		3,6
	3,9	3,9
		4,3
4,7	4,7	4,7
		5,1
	5,6	5,6
		6,2
6,8	6,8	6,8
		7,5
	8,2	8,2
		9,1

Примечания. 1. Для получения номинального значения число из таблицы следует умножить на 10^n .

2. Знак Δ означает допустимое отклонение от номинального значения в процентах.

Таблица И2 – Шкала номинальных значений ёмкостей конденсаторов (С) в микрофарадах

С, мкФ	С, мкФ
0,01	10
0,02	14
0,015	15
0,02	20
0,025	25
0,03	30
0,04	40
0,05	50
0,07	80
0,1	100
0,125	150
0,25	200
0,5	350
1	700
2	800
3	1000
4	1800
5	2000
6	5000
9	

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

.....	3
1. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ	
.....	4
2. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ	5

ПРОЕКТИРОВАНИЕ	
2.1. СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЁМ КУРСОВОГО ПРОЕКТА	6
3. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О БИПОЛЯРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ	
.....	10
3.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ, УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ	
.....	10
3.1.1. Режимы работы и параметры биполярных транзисторов	
.....	12
3.1.2. Схемы включения биполярных транзисторов	13
3.1.3. Статистические характеристики биполярных транзисторов	
.....	15
3.1.4. Эквивалентные схемы биполярных транзисторов	17
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	
.....	19
3.2. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ	
.....	19
3.2.1. Общие сведения и система обозначений полевых транзисторов	
.....	20
3.2.2. Структура и принцип действия полевых транзисторов с управляющим <i>p-n</i> -переходом	
.....	21
3.2.3. Структура и принцип действия полевых транзисторов с изолированным затвором	
.....	23
3.3. КЛАССИФИКАЦИЯ И МАРКИРОВКА БИПОЛЯРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ	
.....	25
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	
.....	26
4. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ТРАНЗИСТОРАХ	
.....	27
4.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ, СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И КЛАССИФИКАЦИЯ УСИЛИТЕЛЕЙ	
.....	27

.....	
4.2. ПАРАМЕТРЫ, ХАРАКТЕРИСТИКИ И ИСКАЖЕНИЯ В УСИЛИТЕЛЯХ	28
.....	
4.3. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ КАСКАДЫ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ ПРИ ПОСТОЯННОМ И ПЕРЕМЕННОМ ТОКАХ	31
.....	
4.3.1. Рабочая точка усилителя и методы её стабилизации	33
4.4. УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД НА ПОЛЕВОМ ТРАНЗИСТОРЕ	36
.....	
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	37
.....	
5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЁТ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ НА КОМПЬЮТЕРЕ	38
.....	
5.1. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ И РАСЧЁТУ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА КОМПЬЮТЕРЕ	38
5.2. ОПИСАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ ELECTRONICS WORKBENCH	40
.....	
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	54
.....	
6. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ	55
.....	
6.1. ПОГРЕШНОСТИ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ	55
.....	
6.2. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ	58
.....	
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	59
.....	
7. НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ	61
.....	
8. РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАКЕТА ПЕЧАТНОГО УЗЛА УСИЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА И ЕГО НАСТРОЙКА	63

.....	
8.1. РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАКЕТА ПЕЧАТНОГО УЗЛА УСИЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ...	63
8.2. НАСТРОЙКА УСИЛИТЕЛЯ В СООТВЕТСТВИИ С ЗАДАНИЕМ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ	66
8.2.1. Испытания усилительных устройств	69
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	
.....	70
9. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ	
.....	71
9.1. РЕКОМЕНДУЕМАЯ МЕТОДИКА РАСЧЁТА УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ	
.....	72
9.2. ПРИМЕР РАСЧЁТА ОДНОКАСКАДНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ ПО СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ	
.....	74
9.2.1. Исходные данные и результаты расчёта усилителя ...	76
9.2.2. Расчёт усилителя по постоянному току	
.....	78
9.2.3. Расчёт усилителя по переменному току	
.....	85
9.2.4. Построение частотных характеристик усилителя	89
9.2.5. Оценка искажений усилителя	
.....	96
10 ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ	
.....	98
11 ПОРЯДОК ЗАЩИТЫ КУРСОВОГО ПРОЕКТА	10
.....	0
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	10
.....	1
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	10
.....	2
Приложение А. ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ КУРСОВОГО ПРОЕКТА	
.....	10
.....	4
Приложение Б. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ	10
.....	5
Приложение В. ВЕДОМОСТЬ КУРСОВОГО ПРОЕКТА	10
.....	6
Приложение Г. ПЕРЕЧЕНЬ ЭЛЕМЕНТОВ	10

