

ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА

УДК 621.396.6 (075.8)
ББК 385 я 73
С - 229

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника»
ФГБОУ ВО «ТГТУ»
А. П. Пудовкин

Доктор технических наук, профессор кафедры передающих
и приемных устройств (средств связи и РТО) ВУНЦ ВВС
«Военно-воздушная академия имени профессора
Н. Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
г. Воронеж
Г. В. Абрамов

В учебном пособии рассматриваются теоретические основы разработки усилительных устройств, методика их расчета и анализа в рамках курсового проектирования усилителей переменного тока на биполярных и полевых транзисторах по дисциплине «Электроника и схемотехника».

УДК 621.396.6 (075.8)
ББК 385 я 73
С - 229

ВВЕДЕНИЕ

Задачей курсового проекта (работы) по дисциплине «Электроника и схемотехника» является изучение методики разработки и исследования усилительных устройств на транзисторах. При разработке усилителей необходимо изучить основы схемотехнического проектирования усилительных каскадов на биполярных и полевых транзисторах. При проектировании усилителей необходимо применять новые разработки в области создания усилительных устройств и современные электрорадиоэлементы.

Основные задачи разработки усилительных устройств заключаются в изучении аналогов предварительных и окончательных усилительных каскадов на биполярных и полевых транзисторах с целью усовершенствования проектируемого усилителя, решении задач согласования входного и выходного сопротивления усилителя, соответственно, с источником входного сигнала и нагрузкой; обеспечения высокого коэффициента полезного действия, минимальных линейных и нелинейных искажений выходного сигнала, а также максимальной мощности в нагрузке.

Для усовершенствования разрабатываемой архитектуры усилительного устройства необходимо применять программные продукты, например, Micro-Cap, Multisim и Electronics Workbench, при моделировании усилительных каскадов на биполярных и полевых транзисторах для расчета и исследования их параметров и характеристик, оценки искажений сигналов в усилительном устройстве.

В учебном пособии изложены основы теории построения усилительных каскадов на биполярных и полевых транзисторах. Рассмотрены их принципиальные электрические и эквивалентные схемы для расчета параметров усилителя, передаточных характеристик и построения амплитудно-частотных характеристик и фазочастотных характеристик, оценки искажений передаваемых сигналов в соответствии с приведенной методикой расчета и анализа усилительных устройств. В пособии приведены также необходимые теоретические сведения о полупроводниковых приборах – биполярных и полевых транзисторах, их структуре и физических процессах, принципе действия, основных параметрах и характеристиках.

Результатом курсового проектирования является разработка принципиальной электрической схемы усилительного каскада на биполярном или полевом транзисторе, а также многокаскадного усилителя в рамках индивидуального задания; изготовленный макет усилителя с выполненной настройкой и регулировкой в соответствии с техническим заданием на его проектирование, метрологическим анализом выходных сигналов и оценкой неопределенности в измерениях параметров усилителей.

В итоге курсового проектирования необходимо привести основные задачи создания усовершенствованной архитектуры усилительных каскадов, отвечающей предъявляемым требованиям к современным усилителям.

1. 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 устройств, так и в целом в электронных средствах.

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

Цели и задачи курсового проектирования:

- обобщение и закрепление знаний, полученных по дисциплинам «Электроника», «Электроника и схемотехника»;
- расширение знаний студентов о физических процессах в полу-проводниковых элементах, их параметрах и характеристиках, о физических процессах, протекающих в электронных цепях и средствах с учетом влияния паразитных параметров и отклонений параметров элементов схем;
- изучение методов расчета 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. КОМПЕТЕНЦИИ, ФОРМИРУЕМЫЕ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «Электроника и схемотехника» В РАМКАХ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В результате освоения дисциплины «Электроника и схемотехника» при выполнении курсового проектирования студент должен обладать следующими компетенциями:

а) профессиональными: ПК - 18 – способность применять методы анализа и расчета типовых аналоговых, импульсных и цифровых схемотехнических устройств.

При проектировании электронных устройств студенты должны учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности; владеть методами решения задач анализа и расчета характеристик электрических цепей; владеть основными приемами обработки и представления экспериментальных данных; собирать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию по тематике исследования, использовать достижения отечественной и зарубежной науки, техники и технологии, проводить эксперименты по заданной методике, анализировать результаты, составлять обзоры, отчеты.

3. СХЕМОТЕХНИКА БИПОЛЯРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

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

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

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 создается одним типом носителей заряда: или электронами или дырками.

3.1. Принцип действия и устройство 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.)

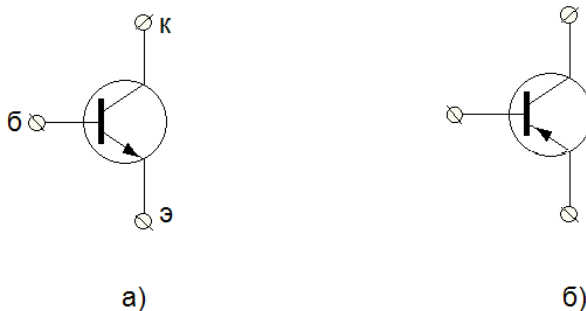


Рис. 3.1. Виды и обозначения на схемах биполярных транзисторов:

а) $n-p-n$; б) $p-n-p$

На рис. 3.1. показано следующее обозначение выводов областей

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

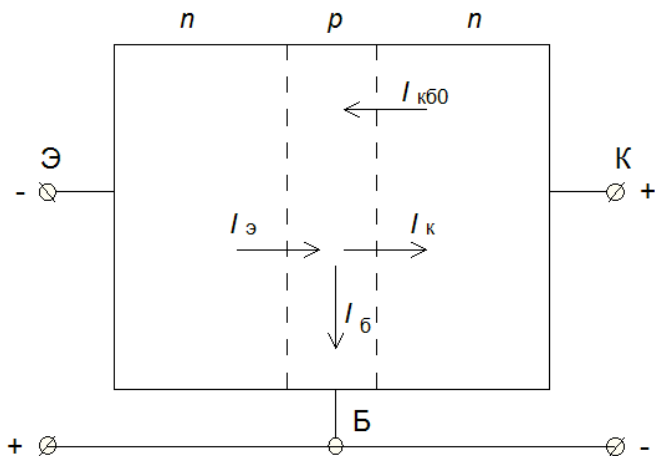


Рис. 3.2. Структурная схема биполярного транзистора

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

$$I_6 = I_3 - I_K.$$

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

$$I_K = \alpha I_3 + I_{кбо},$$

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

3.1.1. Структура и режимы работы 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

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

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. Схемные варианты 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.

Схемы включения транзистора приведены на рис.3.3.

На рис. 3.3 изображена схема включения транзистора с общей базой. На схеме обозначены: напряжение $U_{\text{ЭБ}}$ – входное, $U_{\text{КБ}}$ – выходное.

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

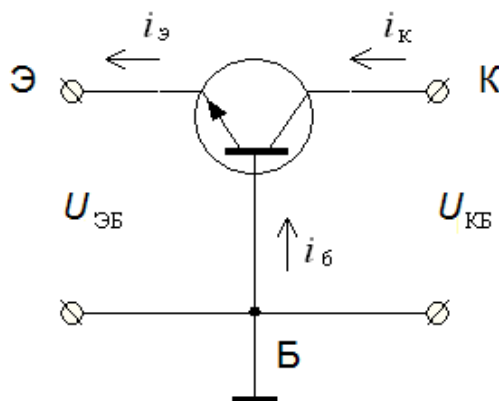


Рис. 3.3. Схема включения транзистора с общей базой

На рис.3.4 представлена схема включения транзистора с общим эмиттером. Напряжение $U_{БЭ}$ – входное, $U_{КЭ}$ – выходное.

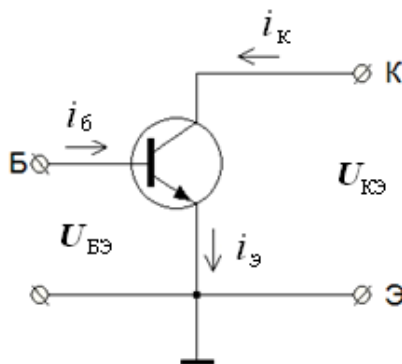


Рис. 3.4. Схема включения транзистора с общим эмиттером

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.

На рис.3.5 показана схема включения транзистора с общим коллектором. Напряжение $U_{БК}$ - является входным, $U_{ЭК}$ – выходным.

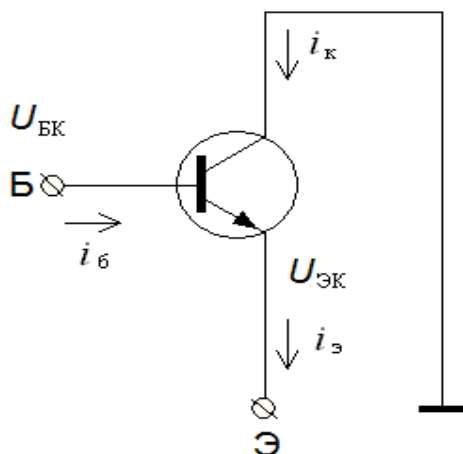


Рис. 3.5. Схема включения биполярного транзистора с общим коллектором

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 сопротивления.

3.1.3. Динамические и 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. На рис. 3.6, а представлены входные статические характеристики для схемы с ОБ, 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.

На рис. 3.7, а приведены входные характеристики схемы с ОЭ, а на

рис. 3.7, б – выходные характеристики.

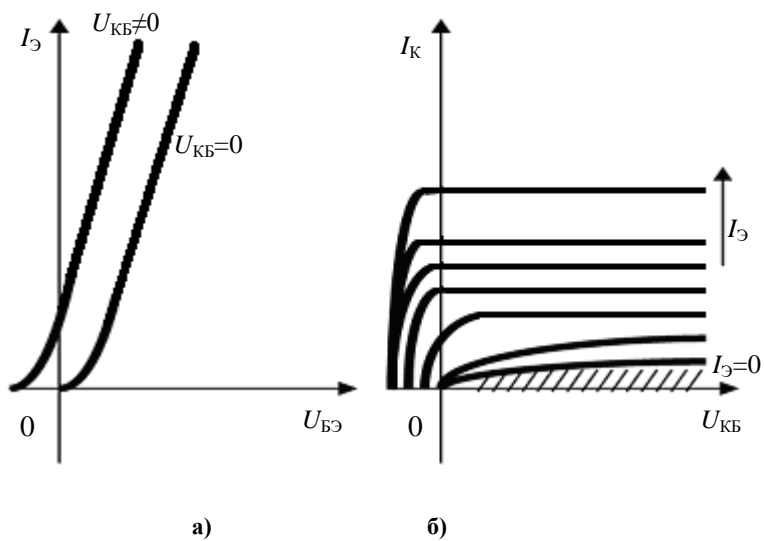


Рис. 3.6. Входные (а) и выходные (б) характеристики транзистора, включенного по схеме с ОБ

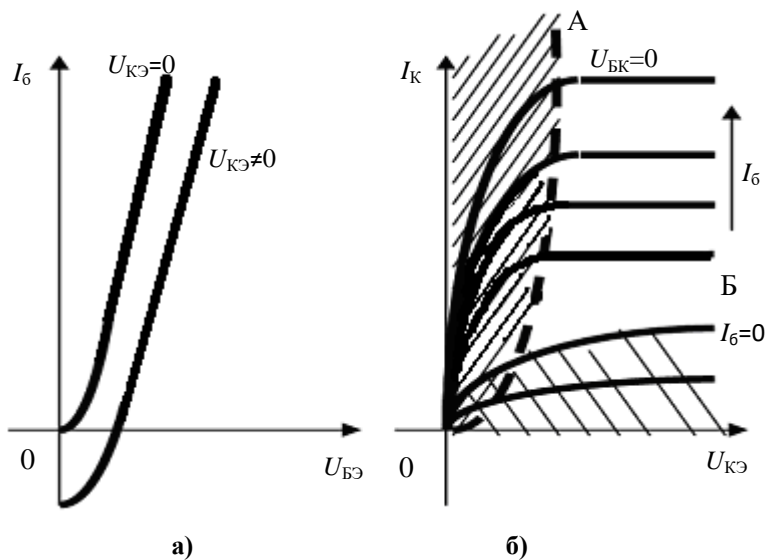


Рис. 3.7. Входные (а) и выходные (б) характеристики транзистора, включенного по схеме с ОЭ

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 расчета параметров транзисторов и выбора соответствующего участка характеристики работы транзистора.

3.1.4. Схемы эквивалентные биполярных транзисторов

Эквивалентные схемы применяются при расчете 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.

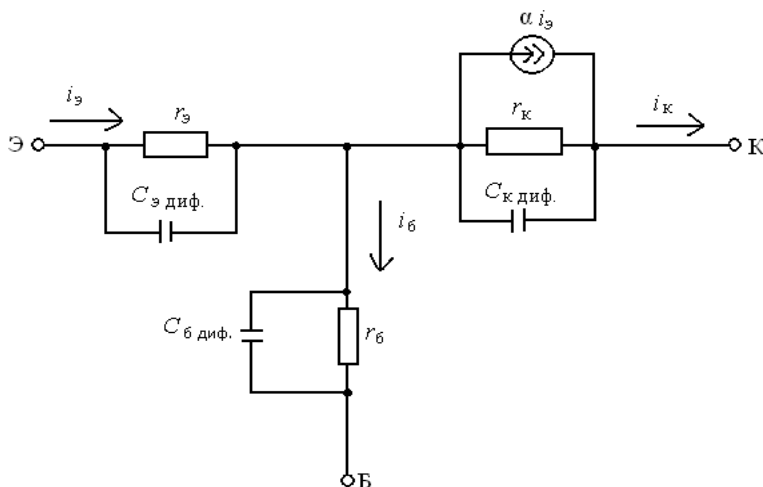


Рис.3.8. Т-образная эквивалентная схема транзистора

По эквивалентной схеме можно определить следующие основные физические параметры транзистора.

Дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода

$$r_{\text{э}} = \left. \frac{dU_{\text{ЭБ}}}{di_{\text{э}}} \right|_{i_{\text{к}} = \text{Const}}$$

где $U_{ЭБ}$ – напряжение, приложенное к эмиттерному переходу; $i_э$ – ток, протекающий в цепи эмиттера.

Дифференциальное сопротивление коллекторного перехода

$$r_k = \left. \frac{dU_{КБ}}{di_k} \right|_{i_э = Const},$$

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

Диффузионное сопротивление базы

$$r_{бдиф} = \left. \frac{dU_{ЭБ}}{di_k} \right|_{i_э = Const}.$$

Дифференциальный коэффициент передачи тока эмиттера

$$\alpha = \left. \frac{di_k}{di_э} \right|_{U_{КБ} = Const}.$$

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



Рис. 3.9. Линейный четырехполюсник

На рис. 3.9. параметры с индексами “1” – i_1 , U_1 , считаются входными, а параметры с индексами “2” – i_2 , U_2 – выходными.

Используя в качестве переменных четырехполюсника i и U , для описания четырехполюсника 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 – $i_б$, выходной ток – $i_к$, входное напряжение – $U_{БЭ}$, выходное напряжение – $U_{КЭ}$.

Контрольные вопросы

1. Как протекает ток в структуре биполярного транзистора?
2. Назовите четыре режима работы биполярного транзистора.
3. По каким формулам рассчитываются параметры биполярного транзистора?
4. Как включается биполярный транзистор по схеме с общим эмиттером, базой и коллектором?
5. Как работает биполярный транзистор?
6. В чем различаются электрические схемы включения биполярного транзистора с общим эмиттером, базой и коллектором?
7. В чем отличие статических и динамических характеристик биполярного транзистора?
8. В чем заключается применение эквивалентных схем биполярного транзистора?
9. Какие параметры рассчитываются по эквивалентной схеме?
10. Какое назначение h -параметров?
11. По каким формулам рассчитываются h -параметры?
12. Почему биполярный транзистор усиливает входной сигнал?

3.2. Принцип действия и устройство 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. Классификация и обозначение полевых транзисторов на схемах

В полевых транзисторах ток создается 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 еще 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 определенной 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.

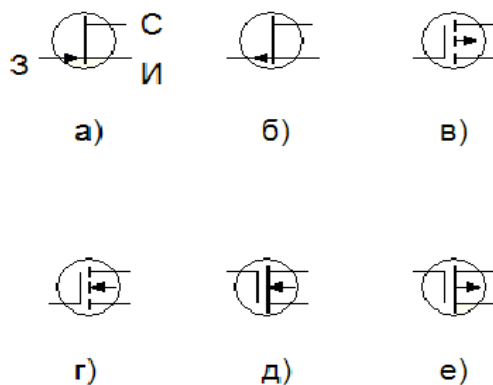


Рис. 3.10. Обозначение полевого транзистора на схемах

- 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

3.2.2. Полевые транзисторы с управляющим p - n - переходом

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

На рис. 3.11 показана структура полевого транзистора с управляющим p - n переходом и n -каналом.

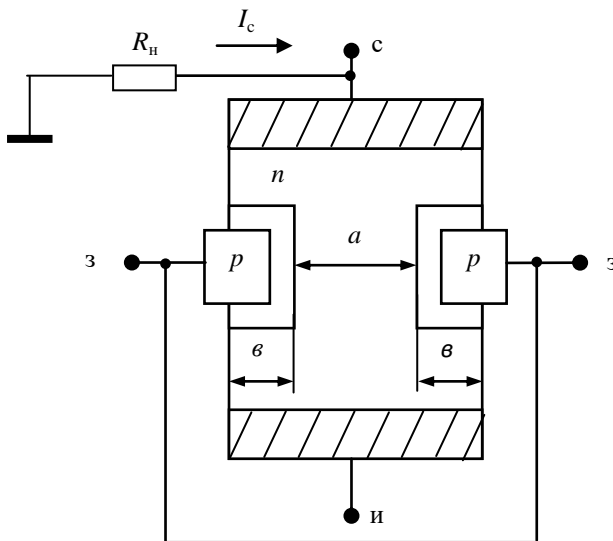


Рис. 3.11. Структура полевого транзистора с управляющим p - n переходом

Транзистор включен 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 объемного заряда (ϕ), что приводит к изменению токопроводящего сечения проводящего канала (a).

При достижении отрицательного напряжения затвор-исток ($U_{зи}$) ве-

личины, 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 обратном смещенном 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.

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 трех областей: линейной, насыщения и электрического пробоя.

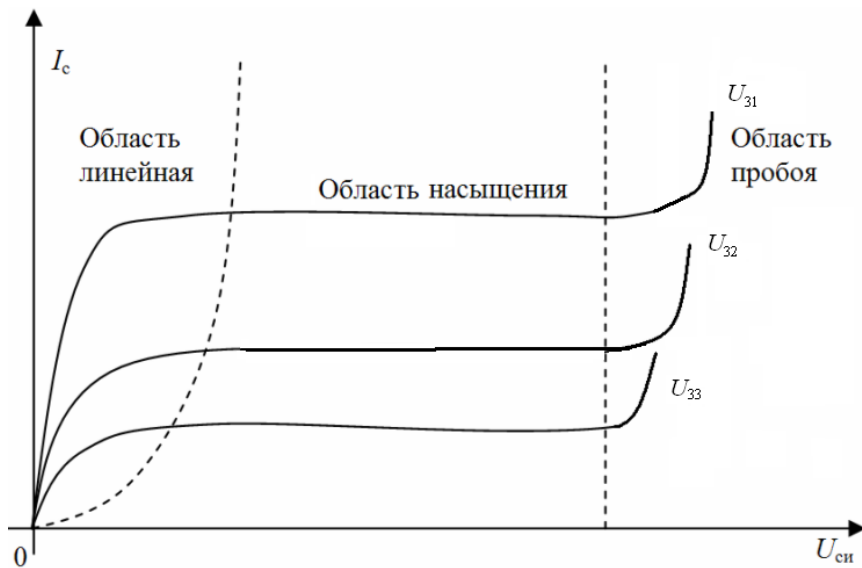


Рис. 3.12. Выходные вольтамперные характеристики полевого транзистора с управляющим p - n переходом

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

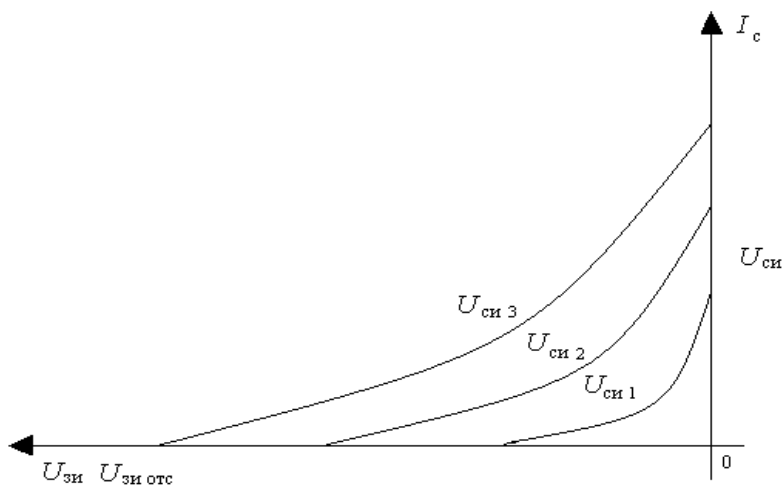


Рис. 3.13. Передаточные вольтамперные характеристики полевого транзистора с управляющим *p-n* переходом

Основные параметры.

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

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

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

$$R_o = \frac{U_{си}}{I_c}.$$

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. Полевые транзисторы 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.

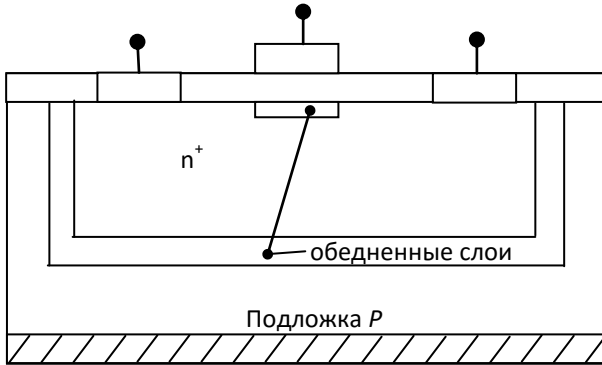


Рис. 3.14. Структура полевого транзистора с изолированным затвором и со встроенным каналом

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

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

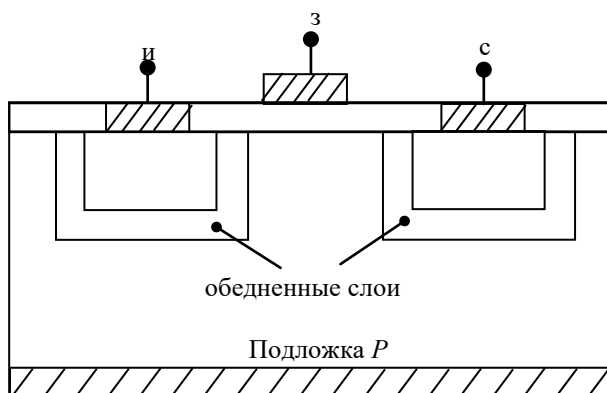


Рис. 3.15. Структура полевого транзистора с индуцированным каналом

Области n^+ вокруг истока и стока при напряжении на затворе, равном нулю, представляют собой два встречно включенных 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, отнесенные 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 1,5Вт).

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 30МГц (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. Почему транзистор называется полевым?
2. В чем особенность принципа действия полевых транзисторов?
3. Чем отличается принцип действия полевых транзисторов со встроенным и индуцированным каналами?
4. По каким формулам определяются параметры полевых транзисторов?
5. Какие носители заряда создают ток в полевом и биполярном транзисторах?
6. Высокое или низкое входное сопротивление полевого транзистора?
7. Как классифицируются полевые транзисторы?
8. Как обозначаются различные виды полевых транзисторов?
9. Какие режимы работы полевого транзистора Вам известны?
10. Поясните статические характеристики полевого транзистора.
11. В чем преимущество полевых транзисторов по сравнению с биполярными?

12. Как можно управлять током полевого транзистора с управляющим p - n - переходом?

4. СХЕМОТЕХНИКА 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 радиоприемных устройствах, информационно-измерительных и телекоммуникационных системах, а также в качестве отдельно функционирующего блока.

4.1. Структура и классификация усилителей

Обозначение усилителя на электрических схемах и структурная схема показаны на рис. 4.1.

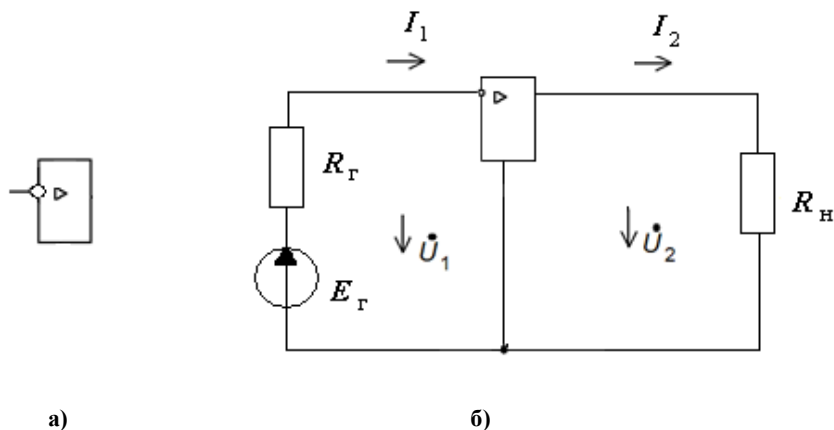


Рис 4.1. Обозначение усилителя на электрических схемах (а) и структурная схема (б)

На рис. 4.1, б обозначено \dot{U}_1 - входное напряжение, \dot{U}_2 - выходное напряжение переменного сигнала, E_r - генератор входного сигнала, R_r - внутреннее сопротивление генератора.

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 выход-

ное 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, емкостной 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 радиоприемных устройствах.

4.2. Параметры и характеристики усилителя

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 приведенных формулах для расчета 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

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_2}{I_2}.$$

4. Выходная мощность усилителя (мощность в нагрузке)

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

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.

На рис.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_r), который характеризует отличие формы выходного сигнала от гармонической и представляет собой отношение среднеквадратичного напряжения суммы всех гармоник выходного сиг-

нала усилителя, кроме первой, к среднеквадратическому напряжению первой гармоники:

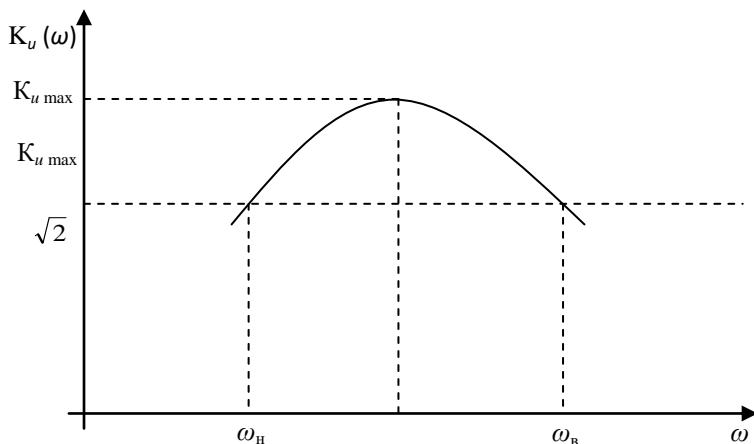


Рис 4.2. Амплитудно – частотная характеристики усилителя

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

где U_i - амплитуда напряжения i -ой 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 уси-

лителя, которые определяют заданные ток, напряжение или мощность в нагрузке.

4.3. Принципиальные электрические схемы усилительного каскада на биполярном транзисторе при постоянном и переменном токе

Усилительные каскады, выполненные на биполярных транзисторах, в зависимости от схемы включения транзистора бывают трех 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, включенном по схеме с общим эмиттером при постоянном токе, приведена на рис.4.3.

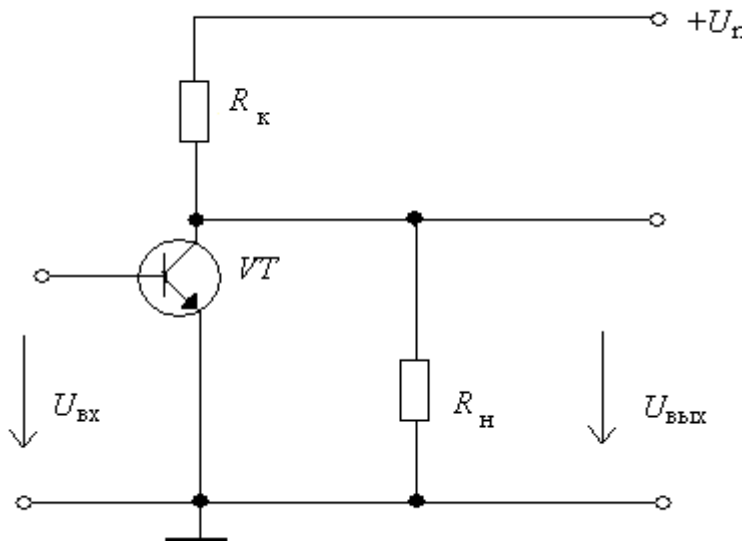


Рис.4.3. Схема усилительного каскада с ОЭ при постоянном токе

Усилительный каскад с ОЭ, приведенный на рис. 4.3, - фазоинверс-

ный, фазы выходного и входного напряжения отличаются на 180° . Резистор R_k является нагрузочным в цепи коллектора транзистора VT. Выходное напряжение снимается с нагрузки, подключенной к коллектору транзистора VT.

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

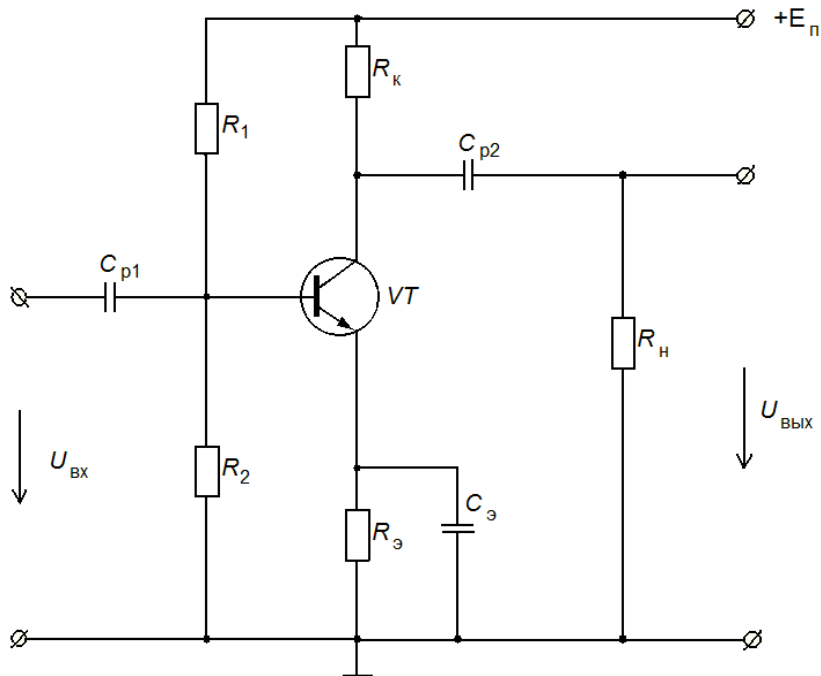


Рис. 4.4. Принципиальная электрическая схема усилителя с ОЭ

На схеме усилителя резистор R_k является нагрузочным в цепи коллектора по постоянному току и определяют 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_e формируется последовательная отрицательная обратная связь по току, служащая для стабилизации рабочей точки. Конденсатор C_e является шунтирующим в режиме переменного тока, обеспечивающим стабильное положение рабочей точки, заданное в режиме постоянного тока.

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. Построение рабочей точки усилителя и методы ее 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 статических характеристик транзистора с ОЭ.

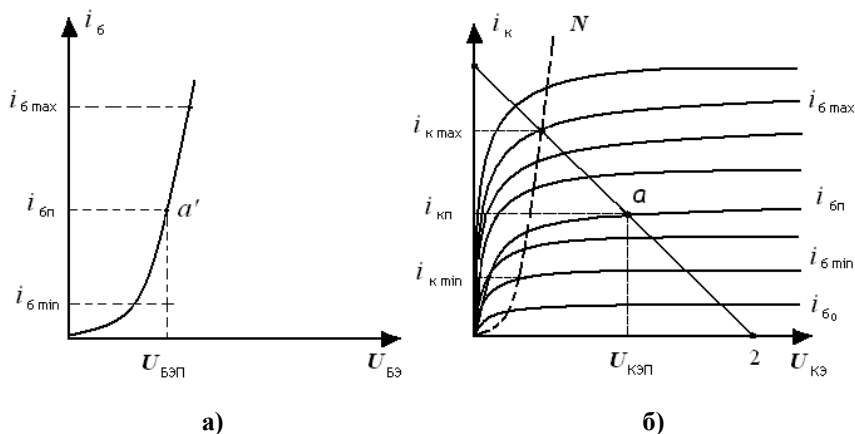


Рис.4.5. Статические входная (а) и выходная (б) характеристики транзистора с ОЭ

Для определения положения рабочей точки на входной характеристике $i_б = f(U_бэ)$ начало линейного участка характеристики обозначим $i_б \min$. Этому значению на выходной характеристике соответствует $i_к \min$. Построим на выходных характеристиках нагрузочную прямую в режимах короткого замыкания и холостого хода. В режиме короткого замыкания ($U_бэ = 0$)

$i_к = \frac{U_n}{R_к}$, где U_n - напряжение питания. На рис. 4.5 этому значению соответствует точка “1”. В режиме холостого хода ($i_к = 0$) $U_кэ = U_n$. На рис. 4.5 это значение показано точкой “2”. Через точки “1” и “2” проводим нагрузочную прямую. Точка пересечения нагрузочной прямой и линии

ОН, показывающей границу режимов работы транзистора насыщения и активного, соответствует $i_{к\max}$ и $i_{б\max}$. Ток коллектора покоя $i_{кп}$, определяется следующим образом

$$i_{кп} = \frac{U_{к\max} - U_{к\min}}{2}.$$

На нагрузочной прямой этому значению тока соответствует рабочая точка a . Для рабочей точки показано напряжение покоя $U_{кэп}$. На входную характеристику перенесем с рис. 4.5. (б) значения $i_{бп}$, $i_{б\max}$, 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).

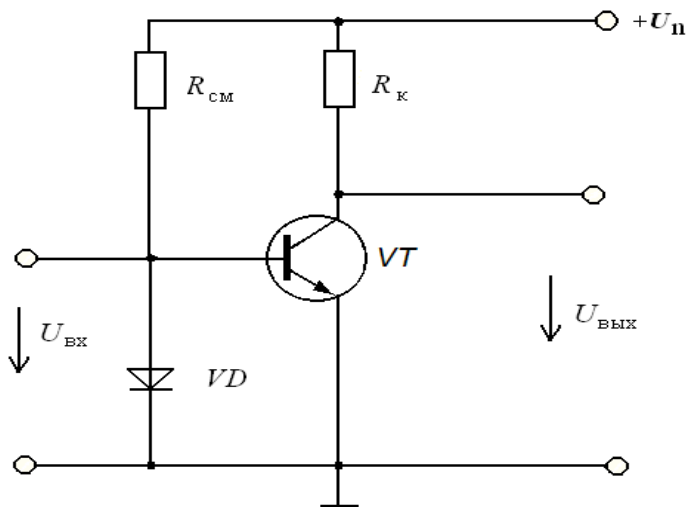


Рис.4.6. Схема усилительного каскада с ОЭ, реализующая метод термокомпенсации

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 остается стабильным. Резистор $R_{см}$ 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.

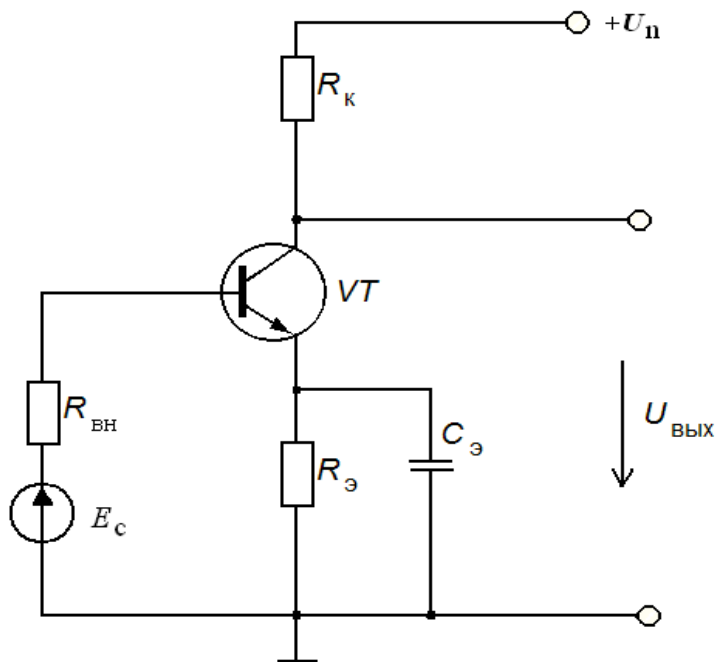


Рис.4.7. Применение метода эмиттерной стабилизации в усилительном каскаде с ОЭ

На схеме (рис.4.7.) введены следующие обозначения: E_c –источник входного сигнала, $R_{вн}$ –внутреннее сопротивление источника входного сигнала; $R_э$ – сопротивление эмиттерного перехода; $C_э$ –шунтирующий

конденсатор большой емкости. 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. Принципиальная электрическая схема усилительного каскада на полевом транзисторе

Схема усилителя на полевом транзисторе, включенном по схеме с общим стоком (ОС), приведена на рис.4.8.

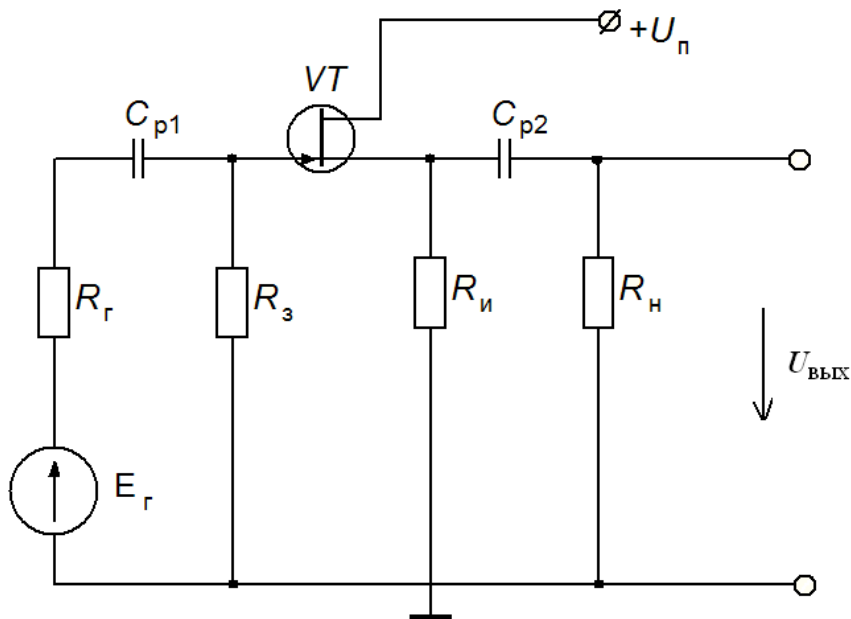


Рис. 4.8. Принципиальная электрическая схема усилителя на полевом транзисторе с ОС

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.

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. На схеме (рис.4.8) обозначено: $R_{г-}$ – внутреннее сопротивление источника входного сигнала (генератора), $R_з$ – сопротивление затвора, которое формирует и стабилизирует входное сопротивление каскада, $R_{и}$ – сопротивление истока, которое задает начальное смещение рабочей точки и ее стабилизацию в результате действия через $R_{и}$ последовательной отрицательной обратной связи по току. Усилитель с ОС не инвертирует фазу усиливаемого сигнала.

Контрольные вопросы

1. Как классифицируются усилители по диапазону частот?
2. Различаются усилители по определенному типу подключаемой нагрузки?
3. По каким зависимостям и формулам рассчитать параметры усилителя?
4. По какой характеристике и каким образом можно определить полосу пропускания усилителя?
5. Какие виды искажений в усилителе известны?
6. Какие основные элементы необходимы в усилительных каскадах переменного тока?
7. Чем отличается последовательная и параллельная обратные связи в усилителях?
8. На какие параметры и характеристики усилителя воздействуют обратные связи?
9. Как задать параметры напряжения смещения усилителя, определяющего рабочую точку усилителя?
10. Как практически вывести усилитель в заданный режим работы?
11. Как осуществляется схемотехническая реализация способов стабилизации рабочей точки?
12. Чем отличаются схемы включения транзисторов с общим эмиттером, базой и коллектором?
13. Какое входное и выходное сопротивления имеет истоковый повторитель?
14. Какой коэффициент передачи по напряжению у полевого транзистора с общим стоком?
15. В чем различие принципиальных электрических схем включения полевого транзистора с общим истоком и с общим стоком?

16. В чем заключается процесс усиления входного сигнала усилительном устройстве?

17. Какие характеристики усилителя характеризуют его динамические свойства?

18. Какая характеристика определяет инерционные свойства усилительного устройства?

19. Какие причины определяют линейные и нелинейные искажения в усилителе?

20. Для каких целей используется амплитудно-фазовая характеристика усилителя?

21. В каких режимах работы работают усилительные каскады на биполярных и полевых транзисторах?

22. Какие дестабилизирующие факторы влияют на нестабильность работы усилителя?

23. Как определить передаточную характеристику усилителя?

24. Как сформировать заданную мощность в нагрузке усилителя?

25. Как устранить линейные и нелинейные искажения в усилителе?

26. Какие существуют методы согласования входного сопротивления усилителя с источником входного сигнала.

27. Какие применяются методы согласования выходного сопротивления усилителя с нагрузкой?

28. Как обеспечивается тепловой режим усилительных элементов, на базе которых выполнен усилитель?

29. Какие задачи решаются при проектировании усилителей на биполярных и полевых транзисторах?

30. Какие факторы определяют частотные и фазовые искажения в усилителе?

5. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ (РАБОТУ)

Задание на курсовое проектирование по дисциплине «Схемотехника электронных средств» студенты дневного отделения получают в начале 5-го семестра, а студенты очно-заочной формы обучения – в начале 7-го семестра. Задание на курсовое проектирование студентам выдает преподаватель, который ведет данную дисциплину.

5.1. Тема и исходные данные для курсового проекта (работы)

Задание может быть индивидуальным или типовым, разработанным руководителем. В рамках типового задания студенты в соответствии со своим вариантом выполняют расчет и анализ усилительных устройств на биполярных и полевых транзисторах. Вариант типового задания определяется двумя последними цифрами номера зачетной 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 электронных устройств во время занятий на филиалах кафедры базовых предприятиях радиотехнического профиля г. Тамбова.

Индивидуальными темами курсового проекта (работы) могут быть следующие:

- разработка усилительных устройств для информационно - измерительных систем;
- расчет и анализ многокаскадных усилителей переменного тока;
- разработка усилительных устройств на новой современной элементной базе;
- расчет и анализ усилительных устройств с использованием программных продуктов Micro-Cap и Multisim на персональных компьютерах;
- разработка функционального узла радиоэлектронного устройства (в пределах объема материала изучаемой дисциплины).

Задание на курсовое проектирование выдается студентам на бланке задания на курсовой проект (работу) установленного образца, приведенном в стандарте предприятия СТП ТГТУ 07-97. В задании указываются тема проекта (работы), исходные данные для проектирования, содержание и объем пояснительной записки, перечень чертежно-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 (работе).

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

5.2. Содержание и объем курсового проекта (работы)

Курсовой проект (работа) включает пояснительную записку и чертежно-графическую часть. Рекомендуемый объем пояснительной записки – 25-30 страниц. Пояснительная записка и чертежно-графическая часть проекта (работы) 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 утвержденным заданием на курсовой проект (работу);
- 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, образец представлен в приложении В.

Задание на курсовой проект является обязательным документом, без которого проект не подлежит проверке и не принимается к защите на кафедре. Пример оформления задания приведен в приложении Б. Задание должно быть утверждено заведующим кафедрой, подписано студентом и руководителем проекта (работы).

В аннотации указываются тема проекта (работы), фамилия студента и руководителя проекта (работы), год защиты, основные проектные

решения, объем пояснительной записки и чертежно-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 малораспространенных сокращений и обозначений, которые повторяются не менее трех 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 утвержденному заданию на проектирование.

Примерный перечень основных разделов пояснительной записки для типового задания:

- исходные данные для расчета усилительного устройства;
- расчет усилителя по постоянному току;
- расчет усилителя по переменному току;
- эквивалентная схема усилительного каскада;
- построение амплитудно-частотной характеристики усилителя;
- построение фазочастотной характеристики усилителя;
- оценка искажений усилителя.

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

В однотипных расчетах при разных вариантах исходных данных порядок расчета можно сократить, а итоги расчетов 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 (работы) 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 (работы) состоит из перечня элементов к электрической схеме электронного устройства, образец выполнения которого приведен в приложении Г; спецификации (приложение Е); чертежа принципиальной электрической схемы, пример оформления которой приведен в приложении Д; чертежа печатной платы макета проектируемого усилителя (приложение Ж); сборочного чертежа печатной платы (приложение З).

5.3. Правила оформления курсового проекта (работы)

Чертежно-графическая часть курсового проекта (работы) выполняется на двух или трех листах ватмана формата А1. На листах приводятся принципиальные электрические схемы проектируемого устройства, эквивалентные схемы и частотные характеристики электронного устройства.

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

- ГОСТ 2.105-95 – ЕСКД. Общие требования к текстовым докумен - там;
- ГОСТ 2.301-68 – ЕСКД. Форматы;
- ГОСТ 2.304 -81 – ЕСКД. Шрифты чертежные;
- ГОСТ 19.401-78 – ЕСКД. Текст программы. Требования к محتوا - нию и оформлению;
- ГОСТ 2.109-73. Основные требования к чертежам;
- ГОСТ 2.417-91. Платы печатные. Правила выполнения чертежей;
- ГОСТ 2.004-88 ЕСКД Общие требования к выполнению конструкторских и технологических документов на печатающих и графических устройствах вывода ЭВМ;
- ГОСТ 2.102-68 ЕСКД Виды и комплектность конструкторских документов;
- ГОСТ 2.104- 2006 ЕСКД Основные надписи;
- ГОСТ 2.051- 2006 ЕСКД Электронные документы. Общие положения;
- ГОСТ Р 34.10 - 2001 Информационная технология. Криптографическая защита информации. Процедура выработки и проверки электронной цифровой подписи на базе ассиметричного криптографического алгоритма;
- 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. При -

боры 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).

- ГОСТ 7.1 2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание.

При оформлении пояснительной записки курсового проекта (работы) с использованием вышеперечисленных государственных стандартов необходимо обратить внимание на следующее:

- в тексте записки следует делать ссылки на чертежно-графическую часть проекта (работы);

- все разделы записки надо начинать излагать с новой страницы;

- нумерация страниц проекта (работы) сквозная, начиная с титульного листа; первым листом является «Содержание»; в «Содержании» проекта (работы) в наименовании разделов и подразделов указываются номера страниц;

- 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;

- подписуночная подпись выполняется следующим образом:

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

Курсовой проект (работа) оформляется в электронной форме в соответствии с требованиями, предъявляемыми к электронным документам. При оформлении материалов курсового проектирования применяются следующие обозначения: ДЭ – документ электронный, выполненный как структурированный набор данных, создаваемым программно-техническим средством; УЛ – информационно-удостоверяющий лист; ЭЦП - электронная цифровая подпись. ДЭ представляется в виде записи информации, составляющий электронный документ, на электронном носителе и воспроизводим только программно-техническими средствами.

Согласно ГОСТ 2.102-68 для текстовых документов к обозначению документа прилагается код ТЭ, для графических документов, представ-

ленных в электронной форме, 2Д.

Структура электронной записи на CD-R диске курсового проекта (работы) представлена следующим образом:

- папка курсового проекта (работы) (название папки – курсовой проект (работа) ТГТУ. 468714.015 ДЭ;

- папка с курсовым проектом (работой) включает три папки:

1. Текстовые электронные документы (обозначение папки – ТГТУ.468714.0154 ТЭ-ПЗ);

2. Графические электронные документы (обозначение папки – ТГТУ. 468714.024 2Д-ЭЗ);

3. Сканированные электронные документы (титульный лист, ведомость курсового проекта (работы), задание, содержание) и удостоверяющие листы (титульный лист, ведомость курсового проекта (работы), задание, содержание).

Реквизиты ДЭ, значением которых является подпись, выполняются в виде ЭЦП по ГОСТ Р 34.10. Порядок использования ЭЦП и применяемые программно-технические средства в пределах одной организации устанавливаются в зависимости от наличия конкретного информационного, программного и организационного обеспечения.

При подготовке ДЭ допускается выполнять реквизитную часть в форме информационно-удостоверяющего листа. Рекомендуемая форма УЛ приведена в приложении И.

При подготовке УЛ на электронный документ ДЭ ему присваивают обозначение ДЭ на это изделие с добавлением кода УЛ. Например, ТГТУ. 468714.015 УЛ.

В УЛ указывают обозначения электронных документов, для которых он подготовлен, фамилии и подлинные подписи лиц, разрабатывающих, согласовывающих и утверждающих электронный документ. Подпись лица, разрабатывающего ДЭ и УЛ, и нормоконтролера являются обязательными. Количество строк для подписей при необходимости может быть увеличено. Образец заполнения информационно-удостоверяющего листа представлен для курсового проекта (работы) (Приложение И).

Удостоверяющий лист хранится вместе с электронным документом.

Оформленный курсовой проект (работа) помещается в пластиковую папку-скоросшиватель, на которую наклеивается этикетка по образцу, приведенному в стандарте предприятия СТП ТГТУ 07-97. Папка содержит следующие материалы проекта (работы): титульный лист, ведомость курсового проекта (работы), задание, содержание, удостоверяющие листы (титульный лист, ведомость курсового проекта (работы), задание, содержание), CD-R диск в конверте с этикеткой по образцу из стандарта предприятия СТП ТГТУ 07-97.

После защиты курсового проекта (работы), подписей членов комиссии по его защите и утверждении проекта (работы) заведующим

кафедрой студент записывает отсканированные документы: титульный лист, ведомость курсового проекта (работы), задание, содержание, удостоверяющие листы (титульный лист, ведомость курсового проекта (работы), задание, содержание) на CD-R диск и сдает курсовой проект (работу) преподавателю.

Для передачи курсового проекта (работы) преподавателем в архив кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» к курсовому проекту в приложение помещается перечень документов для передачи проекта (работы) в архив. Образец заполнения перечня документов представлен в приложении К.

6. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

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.

6.1. Методические рекомендации и этапы выполнения курсового проекта (работы)

Разрабатывая усилительное устройство на базе биполярных транзисторов и выполняя его расчет, 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. Надо изучить эквивалентные схемы, которые используются для расчета 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 обедненной 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 индуцированным и со встроенным каналами.

Студенты должны в полном объеме 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 расчета и анализа искажений сигналов, регулировку усилителей, учета и возможного устранения паразитных обратных связей в усилителе (емкостной 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 расчетных аналитических зависимостях, приведенных в рекомендуемой литературе для известных аналогичных усилительных устройств.

При расчете 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 др., необходимо увеличить допустимый интервал их значений, т.к. существует разброс параметров используемых в усилителе электрорадиоэлементов (конденсаторов, резисторов, транзисторов) из-за производственной погрешности их изготовления.

После выполнения расчета 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 расчетные, а номинальные их значения. При выборе номинальных значений конденсаторов, если расчетные 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 расчетной части пояснительной записки только для нескольких электрорадиоэлементов, а для остальных элементов указываются выбранные из справочников их номинальные значения.

Расчет и анализ усилительного устройства в курсовом проектировании рекомендуется проводить на компьютере с использованием извест-

ных программных продуктов, например Electronics Workbench.

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

Основные этапы расчета:

1. Анализ исходных данных для расчета усилителя.

1. Выполняется расчет усилителя по постоянному току, определяются значения резисторов, h –параметры транзистора. Проводится графическое построение нагрузочной прямой по постоянному току, определяется рабочая точка, ток и напряжение покоя транзистора.

2. Проводится расчет усилительного каскада по переменному току, выполняется графическое построение нагрузочной прямой по переменному току, определяются токи и напряжения на входе и выходе усилителя, рассчитываются усилительные параметры (коэффициенты усиления каскада по току, напряжению и мощности, входное и выходное сопротивление усилителя).

3. Построение частотных характеристик усилителя, определение полосы пропускания, расчет значений емкостей конденсаторов усилителя.

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

6.1.1. Разработка принципиальной электрической схемы усилительных каскадов на биполярных транзисторах при курсовом проектировании

В курсовом проекте (работе) выполняется разработка электрической принципиальной схемы усилительного устройства, ее анализ, синтез и расчет для обеспечения оптимального режима функционирования проектируемого усилителя. Разработанный усилитель при его эксплуатации должен обеспечивать надежность работы, устойчивость к воздействию дестабилизирующих факторов. Для этого в номинальных параметрах усилителя предусматриваются допуски на отклонение параметров усилителя от допустимых значений.

На защиту в курсовом проекте (работе) выносится в качестве специального задания принципиальная электрическая схема усилителя, для которого проводится расчет, анализ параметров и характеристик.

При разработке электрической схемы усилителя необходимо изучить аналоги проектируемого устройства с целью изучения их недостатков и преимуществ. В результате курсового проектирования проводится усо-

вершенствование изученных аналогов усилительного устройства.

При разработке электрической схемы усилителя реализуется следующая методика его проектирования:

а) разрабатывается принципиальная электрическая схема усилителя и приводится в пояснительной записке курсового проекта (работы) ее описание и назначение всех элементов;

в) выполняется анализ принципа действия устройства;

г) проводится расчет параметров схемы по постоянному и переменному току;

д) осуществляется выбор усилительного элемента, на базе которого проектируется усилитель (биполярный или полевой транзистор);

е) если параметры схемы не соответствуют требованиям технического задания, то проводится повторный анализ работы электрической схемы устройства и замена транзистора, не удовлетворяющего требованиям по параметрической группе.

При разработке электрических схем усилителей рекомендуется использовать программы их моделирования, например Electronics Workbench, Micro-Cap и Multisim

При анализе электрической схемы усилителя студент обязан изучить физические процессы, происходящие в усилителе, их параметры и характеристики.

При схемотехническом проектировании усилителя важно проводить анализ расчетных параметров и осциллограмм входных и выходных сигналов усилительных устройств.

При выборе элементной базы следует использовать новейшую современную элементную базу и приводить сравнительный анализ их параметров и характеристик при обосновании выбора транзисторов, на базе которых проектируется усилительное устройство.

Расчет электрической схемы заключается в определении номиналов пассивных элементов схемы: резисторов, конденсаторов, индуктивностей и расчете параметров и характеристик активных элементов: транзисторов. В результате расчета и анализа формируются рекомендации для тепловых расчетов, надежности, электромагнитной совместимости при разработке конструкции проектируемого усилителя.

Разработка и расчет аналоговых усилителей рассматриваются во многих учебниках и справочниках, в которых необходимо также изучить принцип действия элементов и устройств, теорию электрических цепей и сигналов.

Образец выполнения принципиальной электрической схемы приведен в приложении Д данного пособия, перечень элементов представлен в приложении Г.

При схемотехническом проектировании осуществляется модернизация электрической схемы аналога разрабатываемого усилителя. Усовер-

шенствование усилительных устройств заключается в следующем:

- повышение точности выходных параметров и характеристик, стабильности и устойчивости работы усилителя, надежности. Устойчивость усилителя зависит от выбора соответствующей топологии печатных плат, влияющей на емкость монтажа;

- улучшение качественных характеристик усилителя: увеличение выходной мощности, расширение диапазона усиливаемых частот;

- при разработке структуры усилительного устройства применение обратных связей для стабилизации рабочей точки транзистора, обеспечения стабильности коэффициента усиления, уменьшения искажений сигнала на выходе усилителя, задания входного и выходного сопротивлений, формирования амплитудно-частотных характеристик;

- усовершенствование *конструктивно-технологических* показателей заключается в создании макета конструкции усилителя в микроминиатюрном исполнении с выполнением требований стандартов по дизайну, эргономике, ремонтопригодности и использованием современной элементной базы, созданной на основе прогрессивных технологий изготовления, применением высокотехнологических методов для изготовления печатной платы при изготовлении усилителя;

- выполнение моделирования усилительных устройств для выбора наилучшего варианта схемотехнического решения, расчета параметров и характеристик усилителя, выполнения метрологического анализа погрешностей измерения, анализа частотных и переходных характеристик с учетом отклонения и нестабильности параметров и характеристик усилителя при воздействии дестабилизирующих факторов;

- применение новой современной элементной базы при разработке принципиальных электрических схем усилителей, характеризующейся стабильными параметрами, устойчивостью к воздействию дестабилизирующих факторов и надежностью;

- решение важнейшей задачи при передаче входных сигналов в усилителе – повышение линейности проходных передаточных характеристик усилителя и чувствительности по входу, уменьшение искажений сигналов в усилителе;

- замена в усилителе дорогостоящих компонентов на аналоги в результате модернизации усилителя для повышения технико-экономических характеристик.

При проведении анализа схемотехники усилителя в курсовом проекте (работе) следует определить зависимость точности изготовления применяемых электрорадиоэлементов на выходные параметры проектируемого усилителя или установить воздействие условий эксплуатации усилителя на его выходные параметры и составляющие компоненты.

Таким образом, в результате схемотехнического проектирования усилительного каскада на биполярном транзисторе необходимо: описать

принцип действия проектируемого усилителя; провести анализ электрической схемы усилителя; осуществить расчет электрической принципиальной схемы усилителя, заключающийся в определении потребляемого тока и максимальной мощности, рассеиваемой блоком усилителя, обосновать использование применяемой элементной базы.

Разработанная принципиальная электрическая схема усилителя должна соответствовать требованиям, указанным в задании на курсовое проектирование.

6.2. Пример расчета однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе по схеме с общим эмиттером

Схема усилительного каскада на биполярном транзисторе с ОЭ приведена на рис. 6.1.

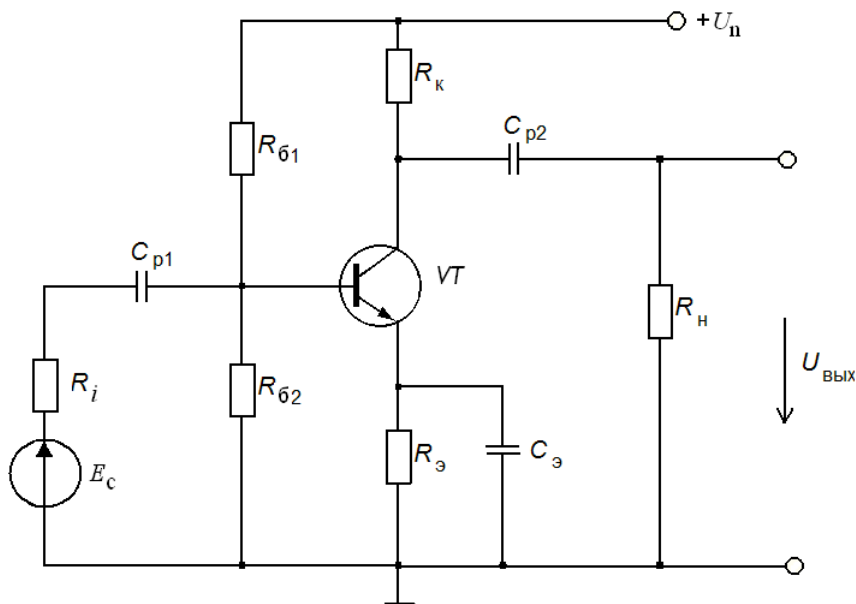


Рис. 6.1. Схема усилительного каскада с ОЭ

Усилительный каскад выполнен на биполярном транзисторе $n-p-n$ – типа. На вход усилителя подключен источник входного сигнала E_c , 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_k является нагрузочным в цепи коллектора по постоянному току, определяет выходное сопротивление усилительного каскада и коэффициент усиления по напряжению K_u . С увеличением значения R_k (до определенного ограничения) коэффициент K_u возрастает.

Для термостабилизации рабочей точки транзистора применяется последовательная отрицательная обратная связь по току, которая формируется через резистор R_3 . Конденсатор C_3 является шунтирующим, служит для увеличения коэффициента усиления каскада по переменной составляющей, а также для формирования частотной характеристики усилителя.

Усилительный каскад на рис 6.1 имеет параллельную структуру, является фазоинверсным, т.к. 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_{61} , R_{62} и входным сопротивлением транзистора h_{11} . Выходное сопротивление каскада зависит от сопротивления коллектора

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

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_6 и коэффициента передачи тока базы β

$$I_k = \beta I_6.$$

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.

6.2.1. Исходные данные, порядок расчета и построения частотных характеристик усилителя

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

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

1. $U_{\text{п}}$ – напряжение источника питания.
2. $U_{\text{м}}$ – амплитуда напряжения на выходе усилительного каскада.
3. $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки.
4. Уровни рабочего диапазона частот:
 $f_{\text{н}}$ – нижнее значение усиливаемой полосы частот;
 $f_{\text{в}}$ – верхнее значение усиливаемой полосы частот.
5. Значения допустимого уровня частотных искажений на нижней и верхней граничных частотах;
 $M_{\text{н}}$ – уровень частотных искажений на нижней граничной частоте;
 $M_{\text{в}}$ – уровень частотных искажений на верхней граничной частоте.
6. Рабочий диапазон температур окружающей среды:
 $t^{\circ}\text{C}_{\text{мин}}$ – минимальное значение температуры;
 $t^{\circ}\text{C}_{\text{макс}}$ – максимальное значение температуры.
7. $R_{\text{и}}$ – 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 расчета 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 $I_{\text{к}}$, мощности транзистора P , верхней рабочей частоте $f_{\text{в}}$ и напряжению $U_{\text{кз}}$, и вольтамперные статические входные и выходные характеристики.
2. На статических характеристиках построить нагрузочную прямую, рабочую точку и определить ток и напряжение покоя ($I_{\text{кп}}$, $U_{\text{ксп}}$).
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 емкостей 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.

6.2.2. Методика расчета усилителя по постоянному току

Рассмотрим пример расчета усилителя с ОЭ для следующих исходных данных при расчете усилительного каскада с ОЭ, схема которого приведена на рис. 6.1:

$U_{п} = 25 \text{ В}$; $R_{н} = 120 \text{ Ом}$; $f_{н} = 10 \text{ Гц}$; $M_{н} = 1,1$; $M_{в} = 1,3$; $t_{\min}, ^\circ\text{C} = 0^\circ\text{C}$; $t_{\max}, ^\circ\text{C} = 100^\circ\text{C}$; $R_i = 1 \text{ кОм}$.

Выбираем транзистор VT, исходя из выполнения следующих условий.

Сопротивление коллектора

$$R_k = K_n R_n ,$$

где $K_n = 5 \div 10$.

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

$$U_{кэ_{\max, \text{доп}}} \geq U_{п} ,$$

Принимаем $U_{кэ_{\max, \text{доп}}} = 25 \text{ В}$;

Допустимая максимальная мощность

$$P_{K_{\max, \text{доп}}} \geq I_{KП} \cdot U_{KЭП},$$

где

$$I_{KП} = \frac{(U_{П} - U_{К})}{R_{К}}.$$

Полагаем

$$U_{К} = \frac{U_{П}}{2},$$

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

$$P_{K_{\max, \text{доп}}} \geq I_{KП} \cdot U_{KЭП} = 0,010 \text{ А} \cdot 12,5 \text{ В} = 0,125 \text{ Вт}.$$

$$I_{K_{\max, \text{доп}}} \geq \frac{U_{П}}{R_{К}},$$

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

Рабочая частота транзистора $f_p > 40 \text{ кГц}$.

По рассчитанным значениям:

$$1) I_{K_{\max, \text{доп}}} = 21 \text{ мА},$$

$$2) P_{K_{\max, \text{доп}}} = 125 \text{ мВт},$$

$$3) I_{KП} = 10 \text{ мА},$$

$$4) f_p = 40 \text{ кГц}$$

из справочника по полупроводниковым приборам (транзисторам малой мощности) выбираем транзистор $n-p-n$ со следующими параметрами (приложение Л):

$$P_{K_{\max}} = 150 \text{ мВт}; f_{гр} = 250 \text{ МГц}; U_{КЭ} = 25 \text{ В}; I_{K_{\max}} = 100 \text{ мА}; I_{КБО}, \\ I_{КБО} = 0,5 \text{ мкА}; h_{21_{\beta}} = 30 \dots 120.$$

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

Для определения рабочей точки транзистора и уточнения значений тока и напряжения покоя на статических входных и выходных характеристиках биполярного транзистора с ОЭ (рис. 6.2, 6.3) строим нагрузочную прямую на выходных характеристиках $I_k = f(U_{кэ})$.

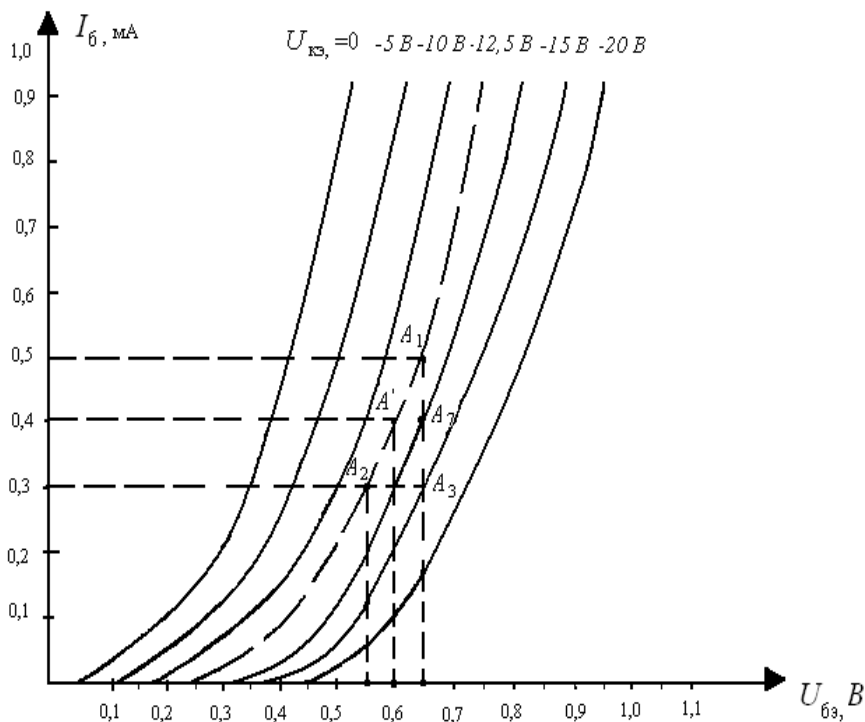


Рис. 6.2. Статические входные характеристики биполярного транзистора с ОЭ $I_б = f(U_{бэ})$

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.

$$U_{\Pi} = I_{\text{к}} \cdot R_{\text{к}} + U_{\text{кэ}}.$$

В режиме ХХ

$$I_{\text{к}} = 0, \text{ при этом } U_{\text{кэ}} = U_{\Pi} = 25 \text{ В}.$$

В режиме КЗ

$$U_{кз} = 0, \text{ при этом } I_{к} = \frac{U_{п}}{R_{к}} = \frac{25 \text{ В}}{1200 \text{ Ом}} = 0,021 \text{ А}.$$

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 $I_{кп}$.

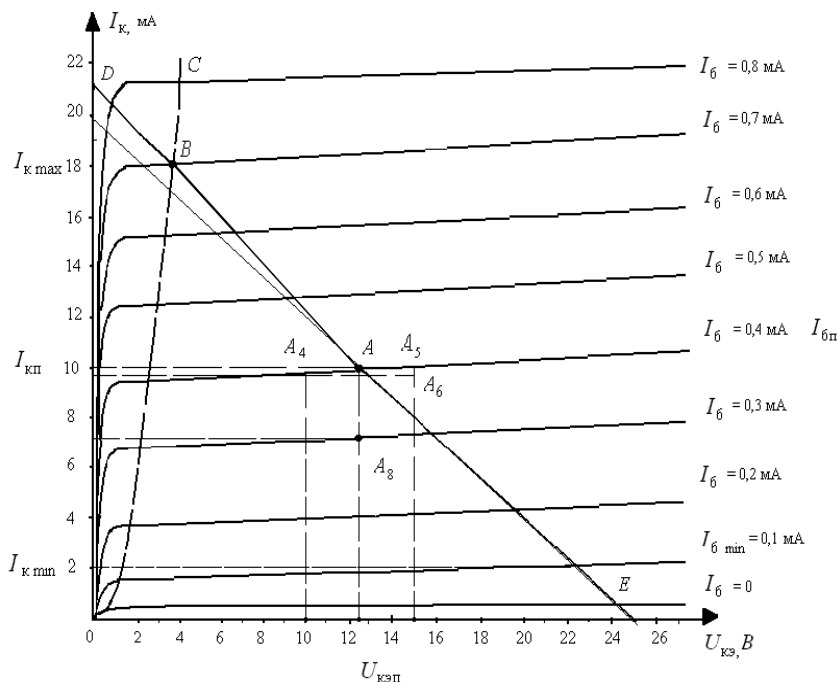


Рис. 6.3. Статические выходные характеристики биполярного транзистора с ОЭ $I_{к} \approx f(U_{кз})$

Для определения $I_{кп}$ откладываем $I_{к \min}$ соответствующий $I_{б \min}$.

$I_{к \max}$ соответствует точка пересечения нагрузочной прямой DE и штриховой линии OC , отделяющей на выходных характеристиках режим насыщения (точка B).

$I_{кп}$ определяется по формуле

$$I_{\text{кп}} = \frac{I_{\text{кmin}} + I_{\text{кmax}}}{2};$$

$$I_{\text{кп}} = \frac{2 \text{ мА} + 18 \text{ мА}}{2} = 10 \text{ мА}.$$

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

Мощность рассеяния на коллекторе $P_{\text{к}}$

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

Согласно справочным данным для выбранного транзистора режим работы транзистора по мощности рассеяния должен быть допустим. Если этот режим не выполняется, то следует увеличить $R_{\text{к}}$ или уменьшить $U_{\text{п}}$.

Выполняется расчет 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 $I_{\text{б}} = 0,4 \text{ мА}$ и напряжению $U_{\text{кэп}} = 12,5 \text{ В}$.

Для построения характеристического треугольника на равных расстояниях от точки A на входных характеристиках откладываются перпендикуляры на ось $I_{\text{б}}$ и $U_{\text{бэ}}$.

Тогда входное сопротивление транзистора

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

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

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

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

$$\Delta U_{\text{кэ}} = 15 \text{ В} - 12,5 \text{ В} = 2,5 \text{ В};$$

$$\Delta U_{\text{бэ}} = 0,05 \text{ В}$$

$$h_{123} = \left. \frac{\Delta U_{63}}{\Delta U_{к3}} \right|_{I_6 = \text{Const}} = \frac{0,05 \text{ В}}{2,5 \text{ В}} = 0,02 .$$

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

$$h_{213} = \left. \frac{\Delta I_{к}}{\Delta I_{б}} \right|_{U_{к3} = \text{Const}} = \frac{3 \text{ мА}}{0,1 \text{ мА}} = 30 .$$

По эквивалентной Т-образной схеме замещения транзистора с ОЭ определяются физические параметры (рис. 6.4) $r_б$, $r_э$, $r_к$, β .

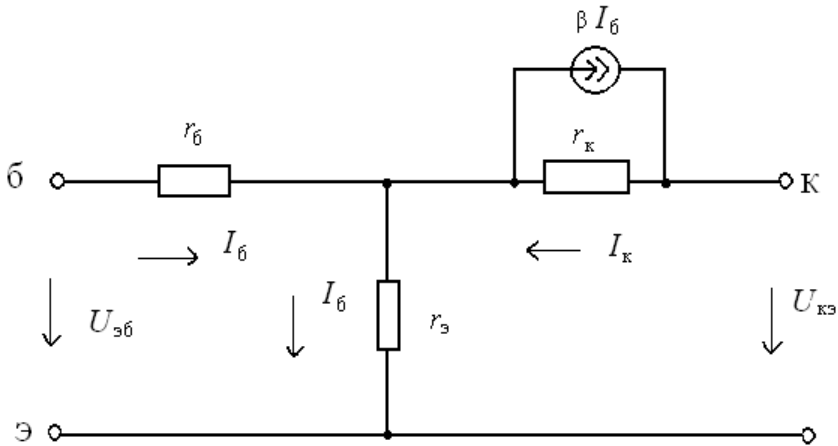


Рис. 6.4. Т-образная схема замещения биполярного транзистора с ОЭ

Коэффициент передачи тока базы β

$$\beta \approx h_{213} \approx 30 ;$$

$$r_э = \frac{h_{123}}{h_{223}} = \frac{0,024}{1,7 \cdot 10^{-4} \text{ мкСм}} = 117,6 \text{ Ом} ;$$

$$r_б = h_{113} - h_{123} (1 + h_{213}) / h_{223} = 500 - 0,02(1 + 30) / 1,7 \cdot 10^{-4} = 3,1 \text{ кОм} ;$$

$$r_к = \frac{h_{213} + 1}{h_{223}} = \frac{30 + 1}{1,7 \cdot 10^{-4} \text{ мкСм}} = 182,4 \text{ кОм} .$$

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) подается 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

$$\Delta I_K = S \left[\frac{\Delta U_3}{R_3 + R_6} + \frac{\Delta I_{KO}}{h_{213}} + \frac{\Delta h_{213} (I_{6П} + I_{KO})}{h_{213}} \right],$$

где S - коэффициент неустойчивости тока коллектора I_K ; ΔU_3 - приращение напряжения на эмиттерном переходе; Δh_{213} - приращение коэффициента передачи по току; R_6 - эквивалентное сопротивление базы; ΔI_{KO} - приращение обратного тока коллектора.

$$S = \frac{h_{213}}{1 + \gamma h_{213}},$$

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

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

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_{63} , для кремниевых транзисторов согласно справочным данным $E = 2 \text{ мВ/град}$.

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

Изменение коэффициента передачи тока при изменении температуры определяется по зависимостям из справочных данных.

Принимаем $\Delta h_{213} = 29$.

Приращение обратного тока коллектора при изменении температуры окружающей среды

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

где T^* - температура удвоения тока коллектора,

T_o - начальная температура, при которой определялся обратный ток $I_{\text{ко}}$ (0°C).

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

Приращение тока коллектора будет равно

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

Подставляем рассчитанные значения S , ΔU_3 , R_6 , $\Delta I_{\text{ко}}$, Δh_{213} в формулу для определения приращения I_K :

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

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

$$R_{61} = \frac{E_K \cdot R_6}{I_3 \cdot R_3},$$

где $I_3 = I_6 + I_K$, $I_6 = I_{6\text{п}}$, $I_K = I_{\text{кл}}$.

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

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

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

Шкала номинальных значений сопротивлений резисторов приведена в приложении М.

Рассчитываем R_{62} по формуле

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

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

6.2.3. Методика расчета усилителя по переменному току

Расчет по переменному току проводится на основе использования эквивалентной схемы, приведенной на рис. 6.5. усилительного каскада с ОЭ переменного тока.

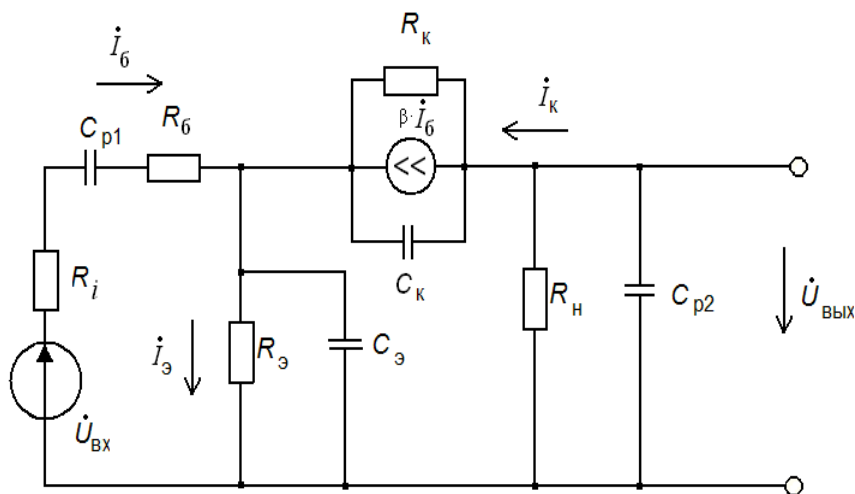


Рис. 6.5. Эквивалентная схема усилительного каскада с ОЭ при переменном токе

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

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

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

$$\begin{aligned} R_{\text{вых ук}} &= \frac{R_{\text{к}} \cdot \frac{1}{h_{223}}}{R_{\text{к}} + \frac{1}{h_{223}}} = \frac{1200 \text{ Ом} \cdot \frac{1}{1,7 \cdot 10^{-4} \text{ мкСм}}}{1200 \text{ Ом} + \frac{1}{1,7 \cdot 10^{-4} \text{ мкСм}}} = \\ &= \frac{1200 \text{ Ом} \cdot 5882,35}{1200 \text{ Ом} + 5882,35} = \frac{7058823,53}{7082,35} = 997 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Коэффициент усиления по напряжению каскада при переменном токе

$$K_U = R_{\text{н}} \parallel \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{э}}} = \frac{R_{\text{н}} \cdot \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{э}}}}{R_{\text{н}} + \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{э}}}} = \frac{120 \text{ Ом} \cdot \frac{1200 \text{ Ом}}{300 \text{ Ом}}}{120 \text{ Ом} + \frac{1200 \text{ Ом}}{300 \text{ Ом}}} = \frac{480 \text{ Ом}}{124 \text{ Ом}} = 3,9.$$

Коэффициент усиления каскада по току

$$K_{I \text{ ук}} = \frac{h_{213}}{1 + h_{223} \cdot R_{\text{к}}} = \frac{30}{1 + 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ мкСм} \cdot 1200 \text{ Ом}} = 29,9.$$

Коэффициент усиления каскада по мощности

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

Емкость разделительного конденсатора $C_{\text{р1}}$ определяется по сле-

дующей зависимости

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

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

$$\begin{aligned} C_{p1} &= \frac{\frac{1}{\omega_H \sqrt{M_H^2 - 1}}}{R_i + R_{\text{вх ук}}} = \frac{\frac{1}{2\pi f_H \sqrt{M_H^2 - 1}}}{R_i + R_{\text{вх ук}}} = \frac{\frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \sqrt{1,1^2 - 1}}}{1000 + 220} = \\ &= \frac{\frac{1}{62,8 \sqrt{0,21}}}{1400} = \frac{\frac{1}{28,89}}{1400} = \frac{0,035}{1400} = 0,000025 \text{ Ф} = 25 \text{ мкФ}. \end{aligned}$$

Емкость конденсатора C_{p2} определяется следующим образом

$$\begin{aligned} C_{p2} &= \frac{\frac{1}{2\pi f_H \sqrt{M_H^2 - 1}}}{R_H + R_K} = \frac{\frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \sqrt{1,1^2 - 1}}}{120 + 1200} = \\ &= \frac{0,035}{1320} = 0,000027 \text{ Ф} = 27 \text{ мкФ}. \end{aligned}$$

По шкале номинальных значений принимаем 25 мкФ.

Шкала номинальных значений емкостей конденсаторов представлена в приложении Н.

Рассчитываем емкость конденсатора C_3

$$C_{\text{э}} = \frac{\frac{1}{2\pi f_{\text{H}} \sqrt{M_{\text{H}}^2 - 1}}}{R_{\text{э}} \parallel \left(r_{\text{э}} + \frac{(r_{\text{э}} + R_{\text{б}} \parallel R_{\text{и}})}{h_{21\text{э}} + 1} \right)},$$

где $R_{\text{б}} = R_{\text{б1}} \parallel R_{\text{б2}}$.

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

Принимаем $C_{\text{э}} = 0,000350 \text{ Ф}$.

Верхняя предельная частота транзистора определяется по следующей зависимости

$$f_{\text{В}} = \frac{\omega_{\text{В}}}{2\pi},$$

$$\text{где } \omega_{\text{В}} = \frac{1 + h_{21\text{э}} \cdot K_{\text{б}} \cdot \sqrt{M_{\text{В}}^2 - 1}}{\tau_{\text{КВЧ}}},$$

где $K_{\text{б}}$ - коэффициент в цепи отрицательной обратной связи, учитывающий ответвление тока коллектора в базу, $\tau_{\text{КВЧ}}$ - постоянная времени, учитывающая нарастание тока коллектора на высокой частоте.

$$K_{\text{б}} = \frac{r_{\text{э}}}{r_{\text{э}} + r_{\text{б}} + R_{\text{и}}^*},$$

$$\text{где } R_{\text{и}}^* = R_{\text{и}} \parallel R_{\text{б}} = \frac{R_{\text{и}} \cdot R_{\text{б}}}{R_{\text{и}} + R_{\text{б}}} = \frac{1000 \text{ Ом} \cdot 400 \text{ Ом}}{1000 \text{ Ом} + 400 \text{ Ом}} = 285,7 \text{ Ом}.$$

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

$$\tau_{\text{квч}} = h_{213} \cdot (R_{\text{н}} \parallel R_{\text{к}}) \cdot C_{\text{к}} + \tau_{\text{к}},$$

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

Рассчитываем $\tau_{\text{квч}}$

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

Подставляем полученные значения $K_{\text{б}}$ и $\tau_{\text{квч}}$ в формулу для определения $\omega_{\text{в}}$

$$\begin{aligned} \omega_{\text{в}} &= \frac{1 + 30 \cdot 0,034 \cdot \sqrt{1,3^2 - 1}}{2,32 \cdot 10^{-8} \text{ с}} = \frac{1,847}{2,32 \cdot 10^{-8} \text{ с}} = 0,8 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{с}}. \\ f_{\text{в}} &= \frac{\omega_{\text{в}}}{2 \pi} = \frac{0,8 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{с}}}{2 \cdot 3,14} = 12,7 \text{ МГц}. \end{aligned}$$

Принципиальная электрическая схема с указанием рассчитанных номиналов элементов приведена на рис. 6.б.

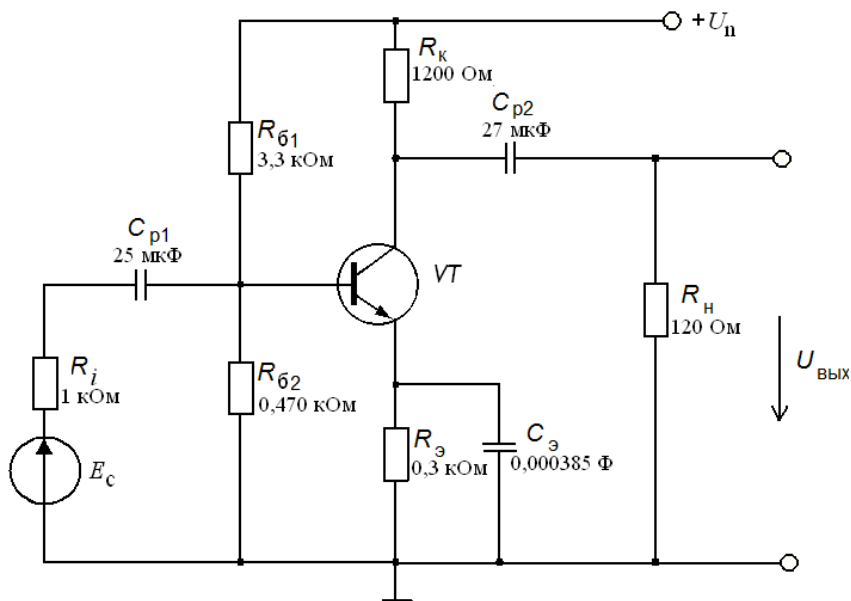


Рис. 6.6. Принципиальная электрическая схема усилителя с рассчитанными значениями номиналов элементов

6.2.4. Методика построения частотных характеристик усилителя

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

Для того, чтобы расчет 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.

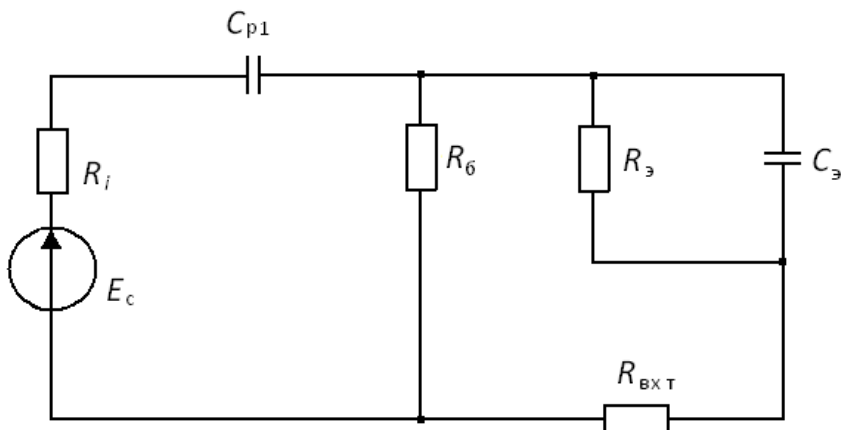


Рис. 6.7. Схема замещения усилителя

Представим схему замещения усилителя, приведенную на рис.6.7, двумя схемами замещения, содержащими по одному реактивному элементу (конденсатору) (рис.6.8).

На схемах замещения рис. 6.8. назначение элементов $R_i, R_6, R_{вх т}$ уже приведено в данном пособии и их значения рассчитаны.

Сопротивление R на рис. 6.8 (б) соответствует выходному сопротивлению схемы, представленной на рис. 6.8 (а).

Приблизненно значение сопротивления R можно определить по следующему соотношению

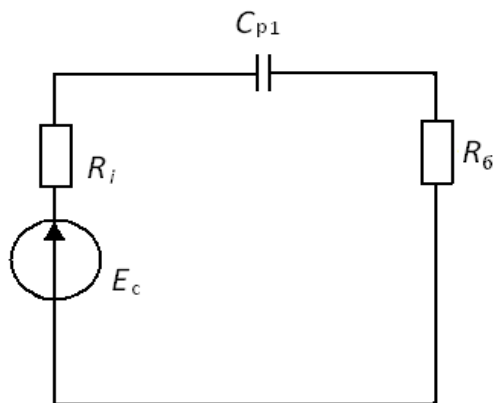
$$R = R_i \parallel R_6 = \frac{R_i \cdot R_6}{R_i + R_6} = \frac{1 \text{ кОм} \cdot 0,4 \text{ кОм}}{1 \text{ кОм} + 0,4 \text{ кОм}} = 0,29 \text{ кОм}.$$

Для составленных схем замещения усилительного каскада передаточные функции записываются следующим образом. Передаточная функция для схемы на рис.6.8а будет определяться по известному выражению для соответствующей RC - цепи

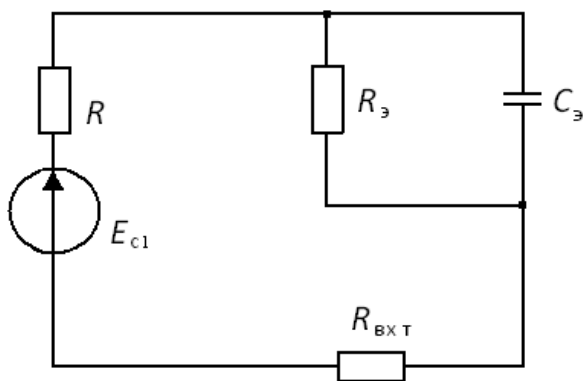
$$K_1(p) = \frac{T_1 p}{T_2 p + 1},$$

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

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



а)



б)

Рис. 6.8. Схемы замещения усилительного каскада: а) схема замещения 1; б) схема замещения 2.

Передаточная функция для схемы на рис. 6.8б 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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 $K_1(p)$.

$$K_1(p) = \frac{T_1 p}{T_2 p + 1} = \frac{T_1 p (T_2 p - 1)}{(T_2 p + 1)(T_2 p - 1)} = \frac{T_1 T_2 p^2 - T_1 p}{T_2^2 p^2 + T_2 p - T_2 p - 1} =$$

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

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) имеет следующий вид

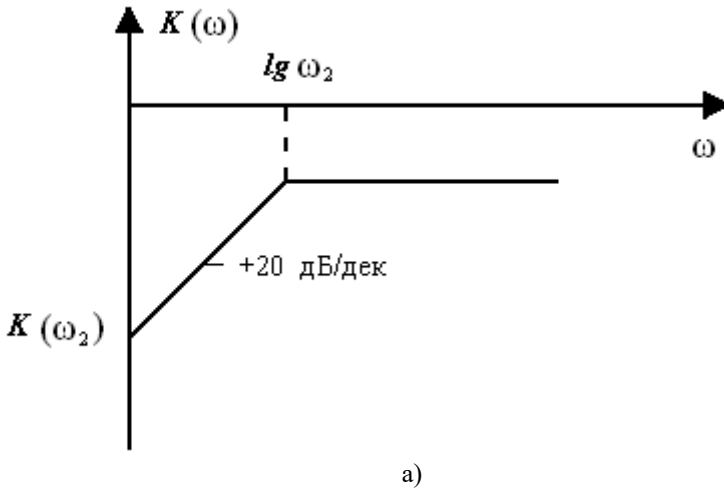
$$K(\omega) = 20 \lg K(\omega) = 20 \lg \sqrt{B^2(\omega) + C^2(\omega)}.$$

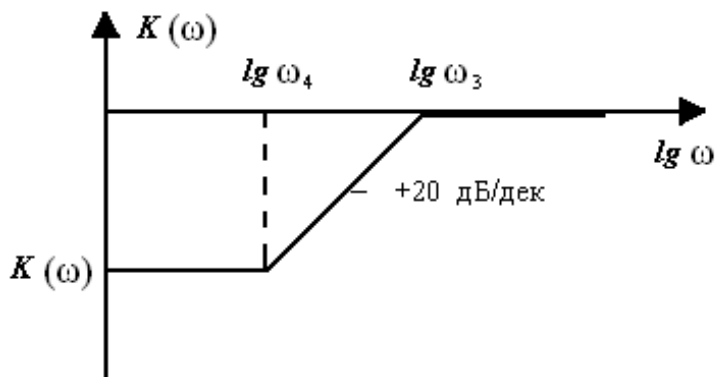
Фазочастотная характеристика (ФЧХ) записывается следующим образом

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

Общий вид логарифмических амплитудно-частотных характеристик для известных RC - цепей и передаточных функций для схем замещения

на рис.6.8 представлен на
рис.6.9.





б)

Рис.6.9. ЛАЧХ известных элементарных RC -цепей: а) для передаточной функции $K_1(p)$; б) ЛАЧХ для передаточной функции $K_2(p)$.

При построении ЛАЧХ на рис.6.9.а обеспечивается наклон характеристики $+20$ дБ/дек до частоты ω_2 , а затем – нулевой наклон. ЛАЧХ на рис. 6.9.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

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

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

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

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

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

$$= 20 \lg \cdot \sqrt{2 \left(\frac{T_1}{2T_2} \right)^2} = 20 \lg \cdot \sqrt{2 \left(\frac{0,01}{2 \cdot 0,035} \right)^2} = 20 \lg \cdot \sqrt{0,0408} =$$

$$20 \lg 0,202 = 20 \cdot (-0,6945) = -13,9.$$

Преобразуем передаточную функцию для схемы на рис. 6.8.б

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

$$\begin{aligned}
&= \frac{K_0(T_3T_4p^2 + T_4p - T_3p - 1)}{(T_4^2p^2 + T_4p - T_4p - 1)} = \frac{K_0(T_3T_4p^2 - 1) + K_0(T_4p - T_3p)}{T_4^2p^2 - 1} = \\
&= \frac{K_0(T_3T_4p^2 - 1)}{T_4^2p^2 - 1} + \frac{K_0(T_4p - T_3p)}{T_4^2p^2 - 1} = \frac{K_0(T_3T_4(-1)\omega^2 - 1)}{T_4^2(-1)\omega^2 - 1} + \\
&+ j \frac{K_0(T_4\omega - T_3\omega)}{T_4^2(-1)\omega^2 - 1} = \frac{K_0(T_3T_4\omega^2 + 1)}{T_4^2\omega^2 + 1} + j \frac{K_0(T_4\omega - T_3\omega)}{T_4^2(-1)\omega^2 - 1}.
\end{aligned}$$

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

$$K_2(\omega) = 20 \lg \cdot \sqrt{\left[\frac{K_0(T_3T_4\omega^2 + 1)}{T_4^2\omega^2 + 1} \right]^2 + \left[\frac{K_0(T_4\omega - T_3\omega)}{T_4^2(-1)\omega^2 - 1} \right]^2}.$$

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.6.9 а. График построенной ЛАЧХ показан на рис. 6.10.

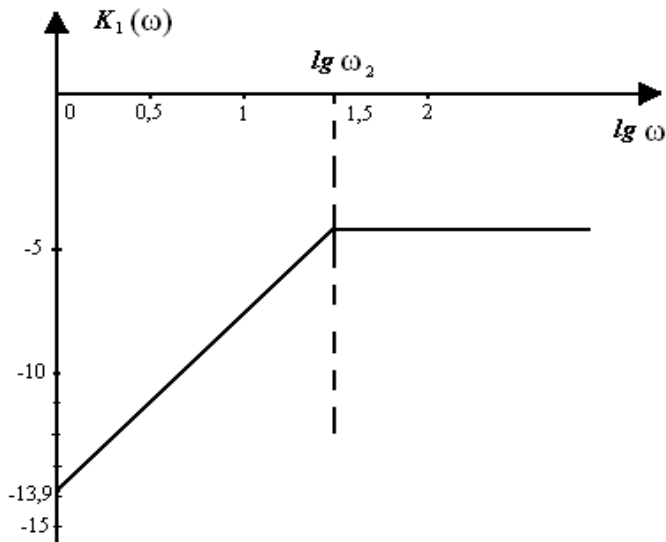


Рис. 6.10. ЛАЧХ RC - цепи усилителя с ОЭ (по схеме замещения на рис. 6.9а)

Построим фазочастотную характеристику усилителя с ОЭ.

Согласно передаточной функции для схемы замещения на рис.6.8а $K_1(p)$ 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. 6.8 б ФЧХ будет иметь следующее выражение

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

Фазо-частотная 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.

6.2.5. Методика оценки 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

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

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_u

$$K_u = 1 + \frac{300 \cdot 10^{-12} \text{ с}}{7 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}} / 285,7 \text{ Ом} + (285,7 \text{ Ом} + \frac{300 \cdot 10^{-12} \text{ с}}{7 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}}) \cdot \frac{(1 - 0,97) \cdot 10,4 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{2} \cdot 0,026 \text{ В} \cdot 285,7 \text{ Ом} = 1,53.$$

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

Курсовое проектирование по расчету и анализу усилительных устройств, построению частотных характеристик рекомендуется проводить с использованием программ Micro-Cap, Multisim и Electronics Workbench для моделирования и анализа электронных компонентов и электрических схем.

7. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА КОМПЬЮТЕРЕ

Программа Electronics Workbench позволяет провести моделирование разрабатываемых усилительных устройств в курсовом проекте (работе), расчет параметров в соответствии с заданием на проектирование, построить амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики усилителя и выполнить их анализ.

При моделировании электрических цепей усилительных устройств студенты могут изучить принцип действия усилительных каскадов на полевых и биполярных транзисторах при воздействии дестабилизирующих факторов: температуры окружающей среды, нестабильности напряжения питания и различных видов нагрузки. Моделирование усилителей позволяет решать задачи согласования входного сопротивления усилительного каскада с источником сигнала и выходного сопротивления - с нагрузкой, расчета температурного режима, обеспечения высокого коэффициента полезного действия и минимальных искажений выходного сигнала, выбора оптимального варианта архитектуры усилителя.

Применение программы Electronics Workbench способствует повышению качества выполнения курсового проекта (работы) и сокращает время его выполнения.

7.1. Описание и применение программы Electronics Workbench

Интерфейс программного комплекса Electronics Workbench.

Интерфейс пользователя состоит из полосы меню, панели инструментов и рабочей области (рис. 7.1).

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).

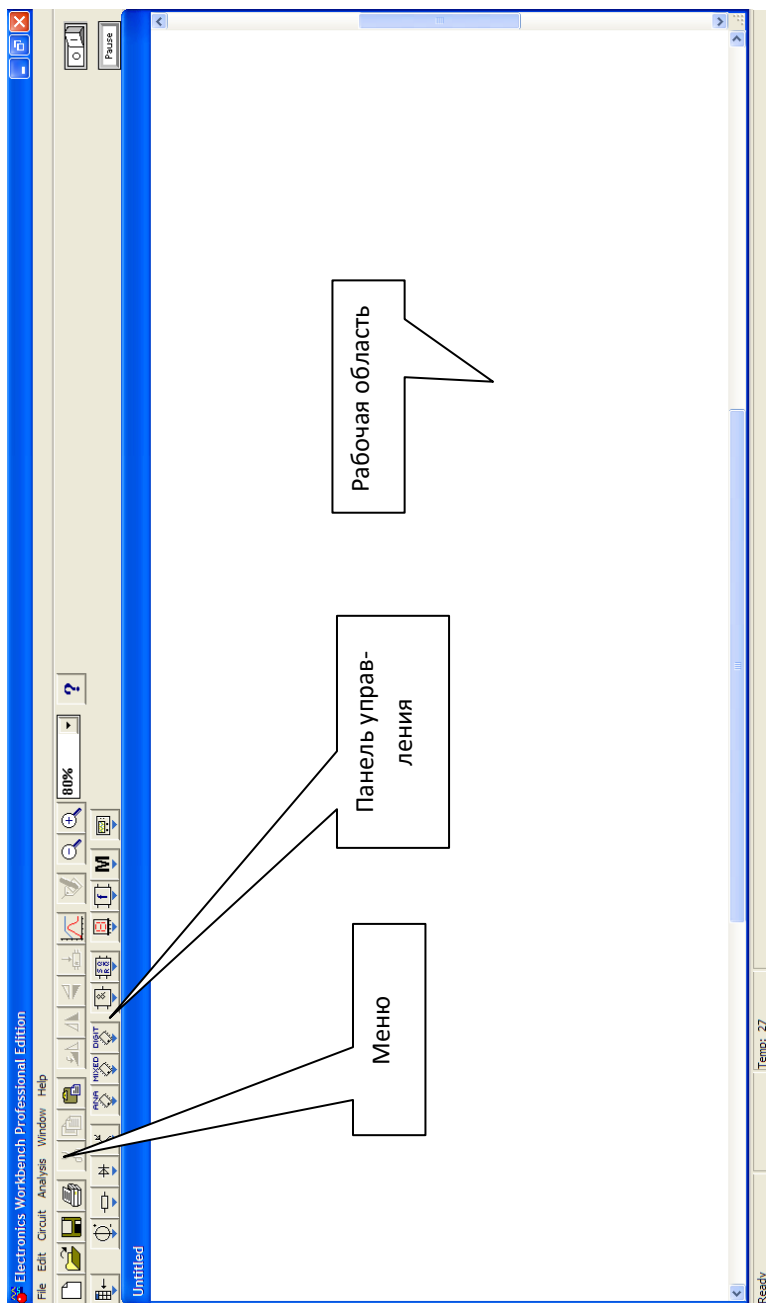


Рис. 7.1. Интерфейс пользователя

Особенностью программы является наличие в панели инструментов ряда кнопок с изображением элементов радиоэлектронных схем (рис. 7.2).

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



Рис. 7.2. Панель инструментов

Построение схем. Процесс построение 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. 7.3.



Рис. 7.3. 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.

На рис. 7.4 представлены источники постоянного напряжения и тока, применяемые в программе для питания электронных схем. Источники напряжения и тока собраны в панели инструментов Sources.

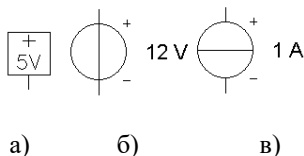


Рис. 7.4. Источники постоянного напряжения

Источник постоянного напряжения VCC (рис 7.4, а) применяется для питания цифровых схем. Батарея (рис. 7.4, б) используется для питания аналоговых и цифровых схем. На рисунке 5.4, в, показан источник постоянного тока.

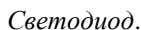
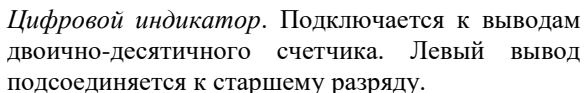
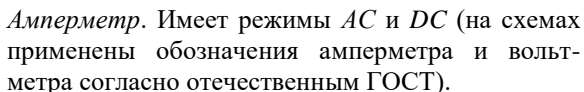
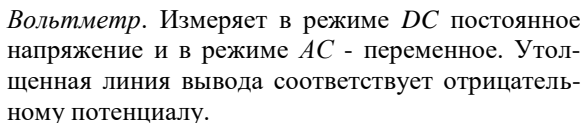
Источники переменного напряжения и тока применяются в качестве входных сигналов в электронных схемах. На рис.7.5 приведены различные источники сигналов.

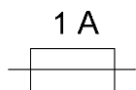
В источнике переменного напряжения (рис. 7.5, а) задается эффективное значение напряжения, частота и фаза сигнала. В источнике переменного синусоидального тока (рис. 7.5, б) задается эффективное значение тока, частота и фаза сигнала. В источнике прямоугольных импульсов (рис. 7.5, в) задается амплитуда, частота и коэффициент заполнения импульсов.



Коэффициент заполнения равен

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





Плавкий предохранитель.



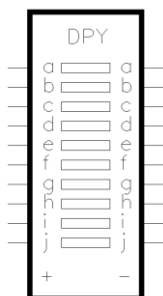
Логический пробник.

200 Hz



Звуковая сигнализация

2 V



Десятисегментный светодиодный индикатор.

Панель инструментов *Basic* содержит *пассивные компоненты* (рис. 7.6).

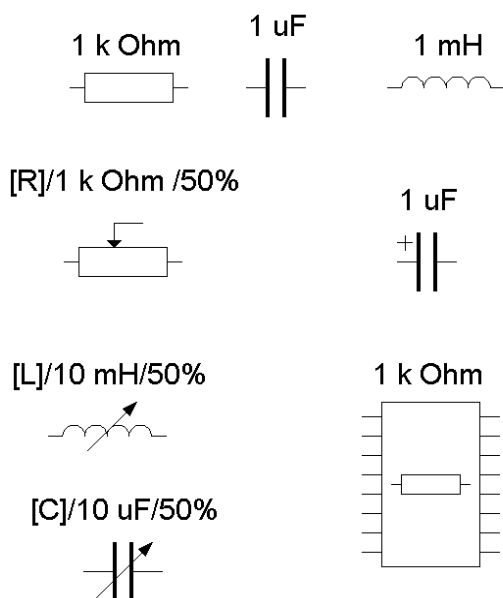
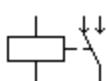


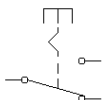
Рис. 7.6. Пассивные компоненты

Панель инструментов содержит также следующие *коммутационные элементы*:



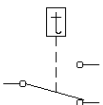
Реле.

[Space]

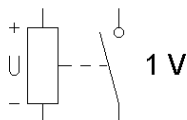


Однополюсный тумблер. Переключается клавишей «пробел» (Space).

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 (кодовый генератор), 16-канальный логический анализатор и логический преобразователь.

Общий порядок работы с приборами следующий.

Мультиметр. На лицевой панели мультиметра (рис. 7.7, 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. 7.7, 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 $V_1=1\text{В}$).

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

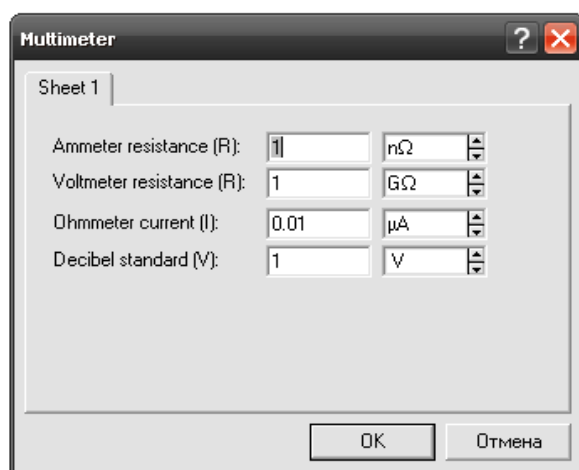


Рис. 7.7. Лицевая панель мультиметра

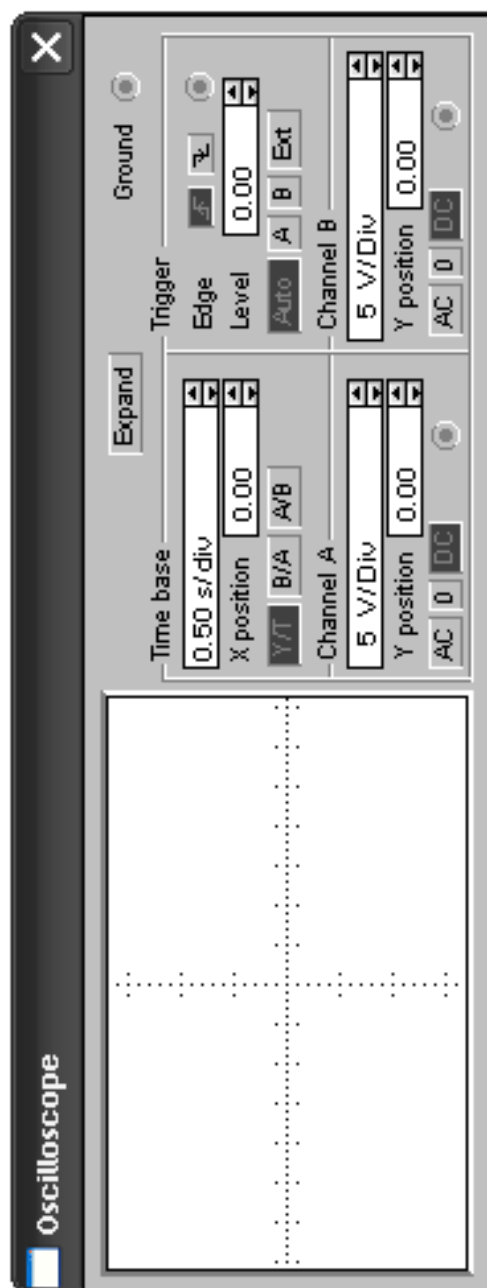



Рис. 7.8. Лицевая панель осциллографа

Осциллограф. Лицевая панель осциллографа приведена на рис. 7.8.

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 развертки (по вертикали - напряжение сигнала, по горизонтали - время) выбирается кнопкой Y/T. В режиме В/А по вертикали откладывается напряжение канала В, по горизонтали - канала А. В режиме Y/T длительность развертки (Time Base) может быть задана в пределах от 0,1 нс/дел до 1 с/дел. Развертка 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 А или В), от канала А, от канала В 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. 7.9. 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 визирной 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.

1-й 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 определенном состоянии. На экране осциллографа просматриваются графики сигналов в выбранных узлах. Для лучшего визуального просмотра на осциллографе подбираются необходимые чувствительность по вертикальному каналу и длительность развертки.

2-й 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

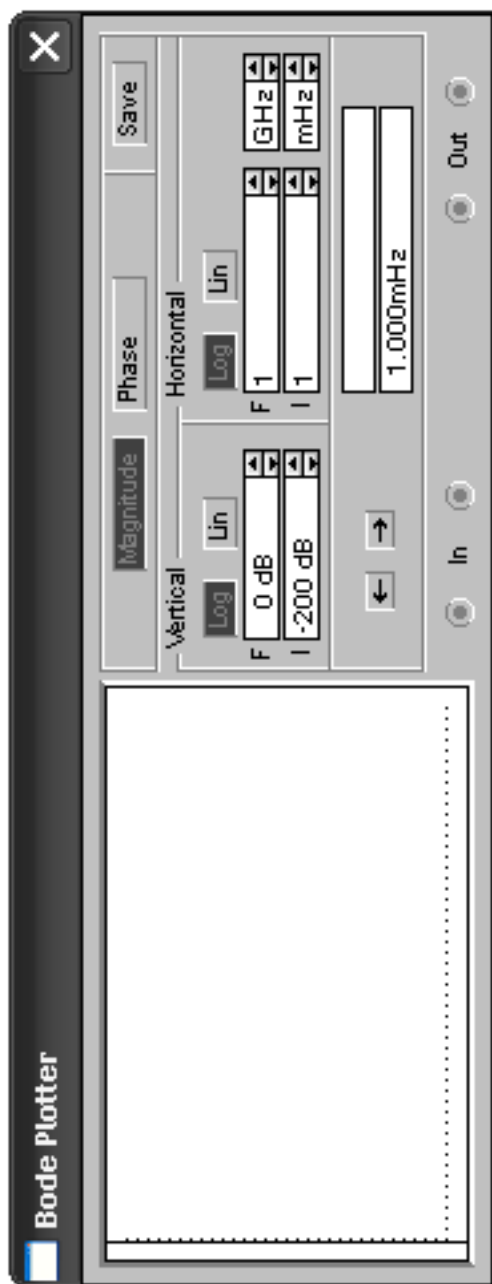




Рис. 7.9. Лицевая панель измерителя АЧХ и ФЧХ

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 увеличить 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. 7.10) 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.

Transient... — расчёт переходных процессов. Диалоговое окно команды (рис. 7.11) 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 модели-

рования задаются с помощью диалогового окна (рис. 7.12), в котором

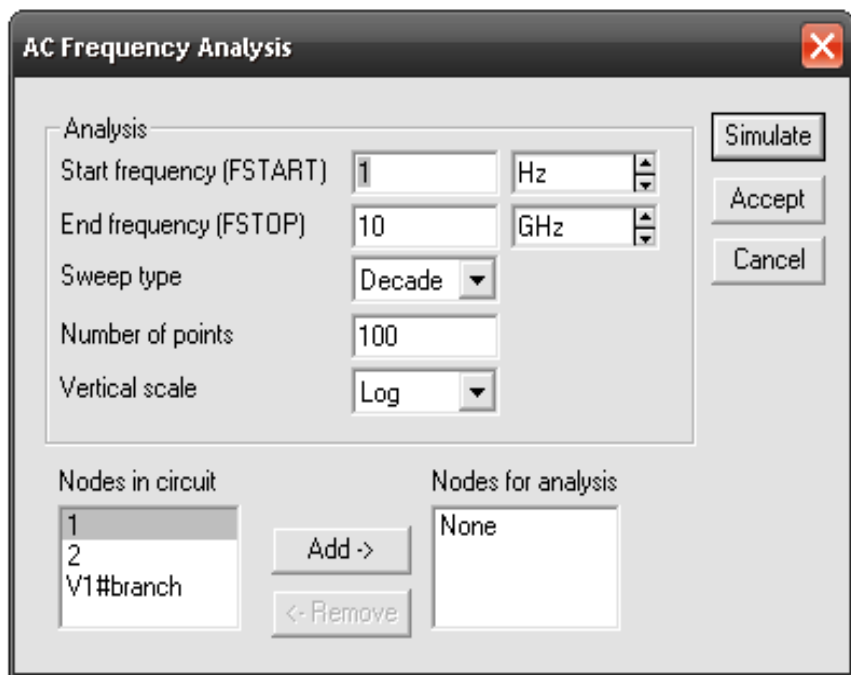


Рис. 7.10. Диалоговое окно задания параметров

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 гар-

моник в виде непрерывной функции (по умолчанию — в виде линейчатого спектра).

Monte Carlo ... — статистический анализ по методу Монте-Карло. В диалоговом окне (рис. 7.13) 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.

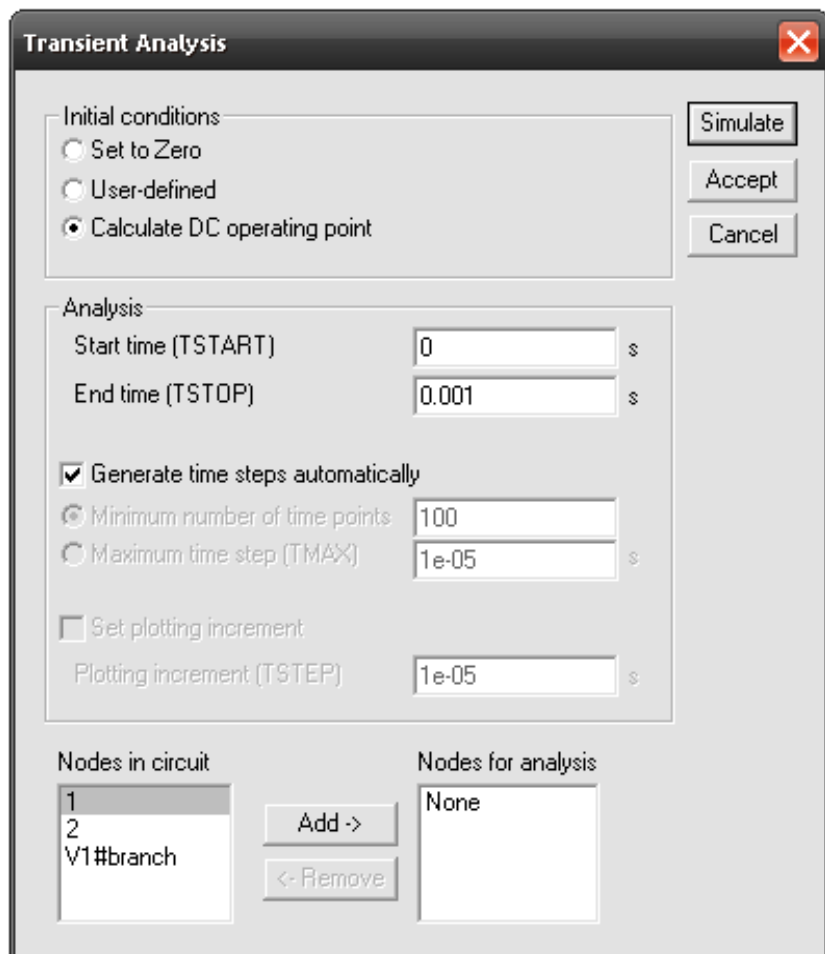


Рис. 7.11. Диалоговое окно команды

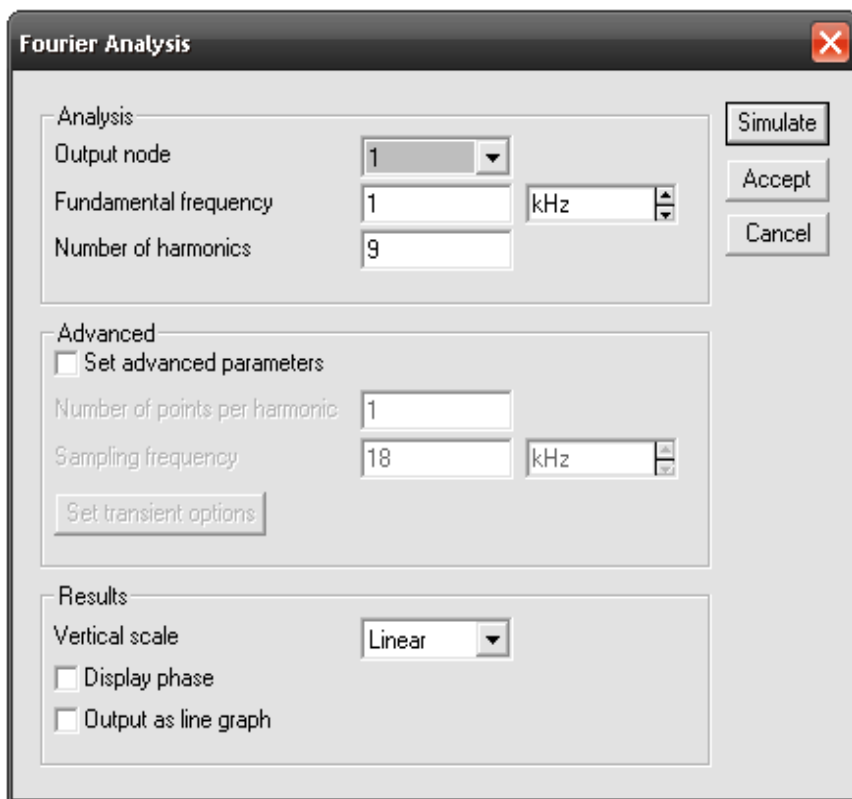


Рис. 7.12. Диалоговое окно задания параметров моделирования

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?

7. Как в программе Electronics Workbench построить частотные характеристики?
8. Как в программе Electronics Workbench построить электрическую схему усилительного каскада?

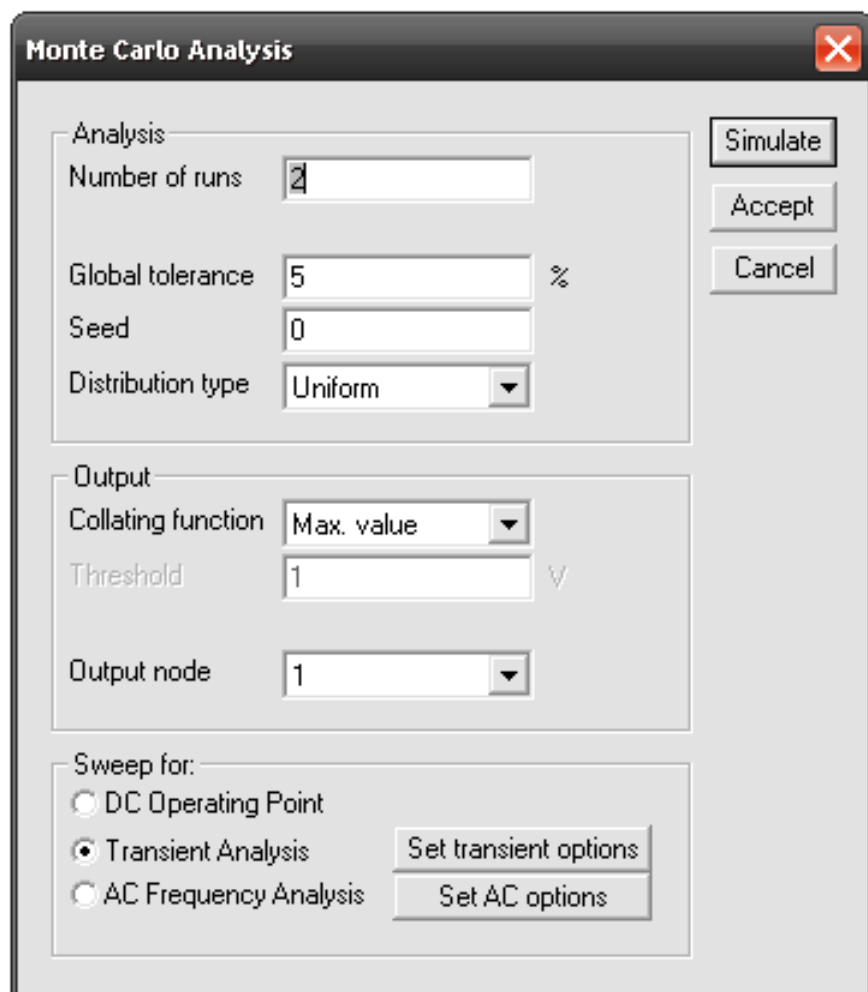


Рис. 7.13. Диалоговое окно параметров

8. МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ, ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАКЕТА УСИЛИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ 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 ГОСТами.

8.1. Разработка и изготовление макета усилителя на биполярном транзисторе

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 нанесенным 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 Е.

4. Для заданной электрической схемы подготовить чертеж печатной платы (приложение Ж).

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 незащищенных участков фольги, предварительно наклеенной на диэлектрик. Для изготовления печатной платы использовать фольгированный стеклотекстолит, который имеет свойство вытравливать определенные участки фольги в специальном растворе, например, хлорного железа. Печатную плату изготовить 2-го класса точности с невысокой плотностью монтажа, с шириной печатного проводника 0.45мм.

6. Подготовить сборочный чертеж печатного узла по образцу приложения З.

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 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. Освоение методики настройки усилителя в соответствии с заданием на курсовое проектирование

При разработке и изготовлении макета усилительного устройства, отвечающего требованиям технологического задания на проектирования 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 каче-

ства 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 требованиям 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 учетом требований технического задания и условий эксплуатации, при необходимости заменить установленные электрорадиоэлементы, полупроводниковые приборы для получения оптимальных параметров.

В соответствии с приведенной 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 приведенной 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 ее линейность;

3) по экспериментальным данным рассчитать коэффициент усиления по напряжению, сравнить с расчетным и заданным значениям. 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 нелинейные искажения усилителя влияет паразитная обратная связь. Паразитная связь может быть между входом и выходом усилителя в результате емкостной 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.

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 влагостойчивость и на механические воздействия?
10. Как осуществляется коррекция параметров и характеристик усилителя при несоответствии их техническому заданию на проектирование?

9. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ (РАБОТУ)

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

Исходные данные вариантов заданий для расчета и анализа усилительного каскада с общим эмиттером, схема которого представлена на рис. 6.1. приведены в табл. 11.1.

Табл.11.1. Исходные данные вариантов заданий для расчета усилителя

Но- мер вариан- та	$U_{п}, В$	$R_{н}, Ом$	$f_{н}, Гц$	$M_{н}$	$M_{в}$	$R_{i}, Ом$	$t_{min}, ^\circ C$	$t_{max}, ^\circ C$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
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

Продолжение табл.11.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
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	1,2	1,2	1100	0	130
16	25	120	10	1,2	1,4	1200	0	100
17	25	117	12	1,2	1,2	1000	0	110
18	25	118	13	1,3	1,2	900	0	120
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	1,3	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	1,3	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	1,2	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	1,2	1,2	900	0	110

Продолжение табл. 11.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
31	25	119	13	1,2	1,4	1200	0	120
32	25	117	8	1,3	1,2	1100	0	100
33	25	120	9	1,1	1,3	1000	0	130
34	25	118	11	1,2	1,4	1100	0	120
35	25	120	12	1,3	1,2	900	0	90
36	25	121	10	1,2	1,4	1000	0	110
37	25	117	12	1,1	1,3	900	0	100
38	25	119	13	1,2	1,2	1200	0	120
39	25	120	9	1,1	1,3	900	0	90
40	25	119	13	1,2	1,4	1100	0	100

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

10. ЗАЩИТА КУРСОВОГО ПРОЕКТА (РАБОТЫ)

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 чертежно-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 выдается 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 расчета 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 свое мнение о направлениях совершенствования усилителя.

8. Защита выпускной работы осуществляется в удобной для наглядного восприятия форме, в виде презентации с использованием оборудования (компьютера, проектора, экрана).

9. 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.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии по курсовому проектированию по дисциплине «Схемотехника электронных средств» приведены структура типового курсового проекта и пример расчета 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 теорией 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 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, расчета и анализа электронных компонентов усилителей, например, программ Micro-Cap, Multisim и Electronics Workbench.

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

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Муханин, Л. Г. Схемотехника измерительных устройств. [Электронный ресурс] / Л. Г. Муханин: учебное пособие. – 2016 г. – 284 с. – Режим доступа: http://www.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=68&pl1_id=275. – Загл. с экрана.
2. Рафиков, Р. А. Электронные сигналы и цепи. Цифровые сигналы и устройства [Электронный ресурс] / Р. А. Рафиков: учебное пособие. – 2016г. – 320 с. – Режим доступа: http://www.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=68&pl1_id=142 1. – Загл. с экрана.
3. Смирнов, Ю. А. Основы микроэлектроники и микропроцессорной техники [Электронный ресурс] / Ю. А. Смирнов, С. В. Соколов, Е. В. Титов: учебное пособие. – 2013 г. – 496 с. – Режим доступа: http://www.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=68&pl1_id=952. – Загл. с экрана.
4. Схемо- и системотехника электронных средств [Электронный ресурс]: методические указания для студентов заочного отделения, обучающихся по направлению 211000 «Конструирование и технология электронных средств» / сост. З. М. Селиванова. – 1 электрон. опт. Диск (CD-ROM)/ – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод 10,7 Mb RAM ; Windows 95/98XP ; мышь. – Загл. с экрана. Регистрационное свидетельство № 35533, номер гос. регистрации 0321401003 от 25.08.2014 г.
5. Новиков, Ю. В. Основы микропроцессорной техники [Электронный ресурс] / Ю. В. Новиков, П. К. Скоробогатов: учебное пособие.- 2016. – 406 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/52207.html>. – Загл. с экрана.
6. Галочкин, В. А. Схемотехника телекоммуникационных устройств / В. А. Галочкин: конспект лекций / Под редакцией д.т.н., профессора Елисеева С. Н. – Самара: ФГОБУ ВПО ПГУТИ – 2015 г.- 385 с.
7. Селиванова, З. М. Схемотехническое проектирование электронных средств: лабораторный практикум / З. М. Селиванова. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с. – 100 экз.
8. Селиванова, З. М. Схемотехника электронных средств: учебное пособие / З. М. Селиванова. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008.- 80 с. – 100 экз.

9. Пухальский, Г. И. Проектирование цифровых устройств [Электронный ресурс] / Г. И. Пухальский, Т. Я. Новосельцева.- Изд-во «Лань», 2012. – 896 с. – Режим доступа: http://www.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=68&pl1_id=757. – Загл. с экрана.

10. Авдеев, В. А. Интерактивный практикум по компьютерной схемотехнике на Delphi [Электронный ресурс] / В.А. Авдеев.- Изд-во «ДМК Пресс», 2009. – 360 с. –

Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=899. – Загл. с экрана.

11. Игнатов, А. Н. Микросхемотехника и электроника [Электронный ресурс] / А. Н. Игнатов. - Изд-во «Лань», 2011.- 528 с. - Режим доступа: http://www.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=127&pl1_id=726. – Загл. с экрана.

12. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника [Электронный ресурс] Т.1 / У. Титце, К. Шенк: изд-во «ДМК Пресс». - 2009. – 942 с. Электронно-библиотечная система. - Режим доступа: <http://e.lanbook.com>. - Загл. с экрана.

13. Селф, Д. Схемотехника современных усилителей [Электронный ресурс] / Д. Селф : изд-во «ДМК Пресс», 2011. – 536 с. Электронно-библиотечная система. - Режим доступа: <http://e.lanbook.com>. - Загл. с экрана.

14. Микросхемы ТТЛ. Справочник : изд-во «ДМК Пресс», 2010, - 384 с. Электронно-библиотечная система. - Режим доступа: <http://e.lanbook.com>. - Загл. с экрана.

15. Батоврин, В. К. Lab View: практикум по электронике и микропроцессорной технике: учебное пособие для вузов / В. К. Батоврин, А. С. Бессонов, В. В. Мошкин: изд-во «ДМК Пресс», 2010. – 182 с. Электронно-библиотечная система. - Режим доступа: <http://e.lanbook.com>. - Загл. с экрана.

16. Опадчий, Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника. /Полный курс/: Учебник для ВУЗов / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И Гуров.- М.:Горячая линия – Телеком, 2002. – 768 с.

17. 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.

18. Бойко, В. И. 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.

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

20. Войшвилло, Г. В. Проектирование усилительных устройств на транзисторах: учебное пособие для вузов/ Г. В. Войшвилло, В. И. Караванов, В. Я. Краева, М. Е. Мовшович, С. А. Новиков. – М.: Связь. – 1972 г. – 184 с.

21. Селиванова, З. М. Общая электротехника и электроника. Учебное пособие по курсовому проектированию. / З. М. Селиванова, Ю. Л. Муромцев // Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 120 с.

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

23. ГОСТ 20406-75. Платы печатные. Термины и определения.

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

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

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

27. 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.

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

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

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

31. 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.: ил.

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

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

34. Взаимозаменяемые транзисторы. Справочник. Петухов В. М. - 2-е изд., стереотип. - М.: ИП РадиоСофт, 2011.- 384 с.
35. Транзисторы в SMD-исполнении. Том 1. Справочник./ Сост. Ю.Ф. Авраменко - К.: "МК-Пресс", 2006. - 544 с, ил.
36. Транзисторы и их зарубежные аналоги. Маломощные транзисторы. Справочник. В 4 т. Т. 1. Петухов В. М. Издание второе, исправленное. - М.- ИП РадиоСофт, 2000.- 688 с: ил.
37. Транзисторы и их зарубежные аналоги. Биполярные транзисторы средней и большой мощности низкочастотные. Справочник. В 4 т. Т. 2. Петухов В. М. Издание второе, исправленное.- М.: ИП РадиоСофт, 2000.- 544 с: ил.
38. Прянишников, В.А. Электроника: Полный курс лекций. – 4-е изд. – СПб: КОРОНА принт, 2004. – 416 с.
39. Ровдо, А.А. Схемотехника усилительных каскадов на биполярных транзисторах / А.А. Ровдо. Додэка XXI, 2008. - 256 с.
40. Селиванова, З.М. Общая электротехника и электроника: учебное пособие / З.М. Селиванова. - Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 72 с. -100экз.
41. 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.
42. Справочник по полупроводниковым приборам / Е.А. Москатов. 2005. -219с.
43. Стандарт предприятия. СТП ПГТУ 07-97. Проекты (работы) дипломные и курсовые. Правила оформления / сост. С.Н. Кузнецов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 40 с.
44. Электронные приборы и устройства на их основе: справочная книга / Ю.А. Быстров, С. А. Гамкрелидзе, Е.Б. Иссерлин, В.П. Черепанов. – М.: Ип Радио Софт, 2002 – 656 с.: ил.
45. ГОСТ 28884-90 (МЭК 63-63) "Ряды предпочтительных значений для резисторов и конденсаторов".

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Титульный лист курсового проекта (работы)

Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования	
"ТАМБОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"	
Кафедра _____	
УТВЕРЖДАЮ	
Зав. кафедрой _____	
подпись, инициалы, фамилия	
" ____ " _____ 20__ г.	
ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА	
к курсовому проекту по: _____	
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 защищен _____ Оценка _____	
Члены комиссии _____	
подпись, дата	инициалы, фамилия
подпись, дата	инициалы, фамилия
подпись, дата	инициалы, фамилия
Нормоконтролёр _____	
подпись, дата	инициалы, фамилия
Тамбов 20__ г.	

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Задание на курсовой проект (работу)

Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования	
"ТАМБОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"	
Кафедра _____	
УТВЕРЖДАЮ	
Зав. кафедрой _____	
<small>подпись, инициалы, фамилия</small>	
" ____ " _____ 20__ г.	
ЗАДАНИЕ № _____ на курсовой проект (работу)	
Студент _____	код _____ группа _____
<small>инициалы, фамилия</small>	
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... _____	

продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б

5 Перечень графического материала _____

Руководитель проекта (работы) _____
подпись, дата инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению _____
подпись, дата инициалы, фамилия

ПРИЛОЖЕНИЕ В
Ведомость курсового проекта (работы)

№	Формат	Обозначение	Наименование	Кол.	№	Примечание
1						
2			Документация общий			
3						
4			Внозь разработанная			
5						
6		ТГТУ.468437.007 ЭЗ	Схема электрическая	1		
7			принципиальная			
8	A1	ТГТУ.468437.007 СБ	Сборочный чертеж	1		
9			печатной платы			
10						
11	A4	ТГТУ.468437.007 ПЗ	Пояснительная записка	38		
12						
13						
14			Документация по деталям			
15						
16			Внозь разработанная			
17						
18	A1	ТГТУ.468437.007	Плата печатная	1		
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
		ТГТУ.468437.007 ВП				
Имя	Лист	№ докум.	Подп.	Диаг.	Усилительный каскад с общим эмиттером	
Рисов.						
Пров.					Ведомость курсового проекта	
Н. контр.						
Одобр.					КРЭМС, гр. БРС-21	
		Лист	Лист	Листов		
		1	1	1		

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Перечень элементов к электрической схеме усилителя

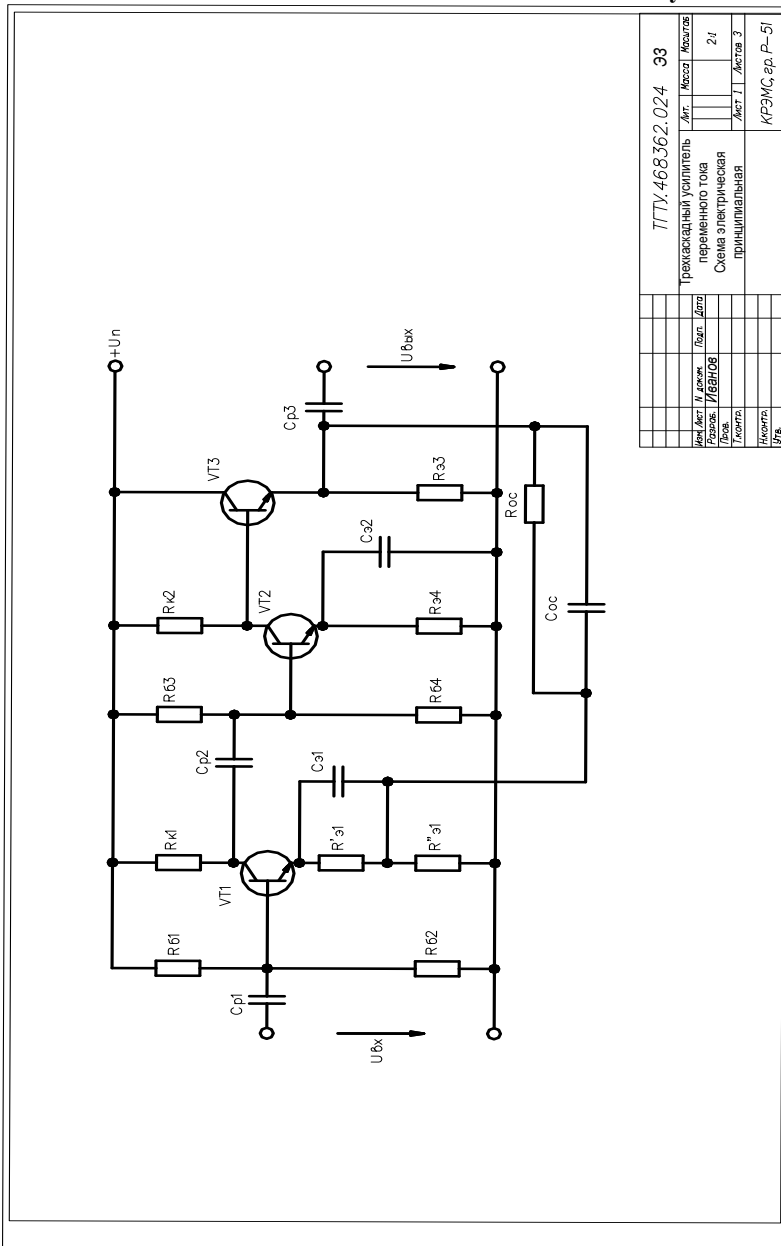
Лист 1	Обоз.	Наименование	Кол.	Примечание
		Конденсаторы		
	C1	K10-17a-H90 0,1 мкФ ОЖО.460.107ТУ	1	
	C2	K10-17a-H90 0,068 мкФ ОЖО.460.107ТУ	1	
Лист 2	C3	K52-1Б 220мкФ×25В±20% ОЖО.464.039ТУ	1	
	C4	K73-16a 0,22мкФ×250В±20% ОЖО.461.108ТУ	1	
	C5	K10-17a-H90 470пФ ОЖО.460.107ТУ	1	
	C6	K73-16a 0,22мкФ×250В±20% ОЖО.461.108ТУ	1	
		Микросхема		
Лист 3				
	DA1	K145АП28КО.347.560-01ТУ	1	
		Лампа накаливания		
Лист 4	EL1	B220-235-60М ТУ16.675.178-86	1	
		Предохранитель		
Лист 5	FU1	ВП1-1 ОЮО.480.003ТУ-Р	1	
		Светодиод		
Лист 6	HL1	АЛ102В аА.339.311ТУ	1	
		Дроссель		
Лист 7	L1	Д201-274 ОЮО.475.013ТУ	1	
Лист 8	Изм. Лист N докум. Подп. Дата			
	Разраб.			
	Пров.			
	Т. Контр.			
	Н. Контр.			
	Утв.			
Лист 9	ТГТУ. 648133. 004 ПЗЗ			
	Сенсорный регулятор мощности			Лист 1 2
	Перечень элементов			
Лист 10	КРЭМС, гр. БРС-21			

Продолжение приложения Г

Лист переч.	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	
Станд. №	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, 1ТВР0.360.002ТУ	1	
Листов и дата		<u>Диоды</u>		
	VD1,VD2	КС515А СМЗ.362.823ТУ	2	
	VD3	КС522А СМЗ.362.823ТУ	1	
	VD4,VD5	КД105Б ТРЗ.360.075ТУ	2	
Ид. №2/б/г				
		<u>Симистор</u>		
Всего шт. №	VS1	КУ208Г ТТ0.343.003ТУ	1	
Листов и дата		<u>Транзистор</u>		
	VT1	КТ630А ЮФЗ.365.043ТУ	1	
Ид. №2/б/г				
ТГТУ. 648133. 004				Лист
Изм. Лист N докум. Подп. Дата				2

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Принципиальная электрическая схема трехкаскадного усилителя



ТТН 468362.024		33	Трехкаскадный усилитель		Лист	Масштаб
переменного тока			Схема электрическая		Лист 1	Листов 3
принципиальная			КРЭМС, гр. Р-51			
Исполн.	Провер.	Дата	Исполн.	Провер.	Дата	
Лист	Лист	Лист	Лист	Лист	Лист	
Исполн.	Провер.	Дата	Исполн.	Провер.	Дата	
Лист	Лист	Лист	Лист	Лист	Лист	

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Спецификация

Лист №	Формат	Знак	Лист	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
Лист 1					Документация		
	A3			ТГТУ. 648133. 004 ЭЗ	Схема электрическая принципиальная		
	A3			ТГТУ. 648133. 004 СБ	Сборочный чертёж		
					Детали		
	A3			ТГТУ. 758725. 004	Плата печатная	1	
					Прочие изделия		
					Диоды		
			1		КД105Б ТРЗ.360.075ТУ	2	VD4, VD5
			2		КС15А СМЗ.362.823ТУ	2	VD1, VD2
			3		КС22А СМЗ.362.823ТУ	1	VD3
Лист 2					Дроссель		
			4		Д201-274 ОЮ0.475.013ТУ	1	L1
					Кнопка		
Лист 3			5		КП-1, 1ТВР0.360.002ТУ	1	SB1
					Конденсаторы		
					КС2-1Б 220мкФ×25В±20%		
Лист 4			6		ОЖ0.464.039ТУ	1	СЗ
Лист 5					ТГТУ. 648133. 004		
	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		
	Разраб.						
	Проб.						
	Т.Контр.						
	Н.Контр.						
	Утв.						
Лист 6					Сенсорный регулятор мощности		
Лист 7							
Лист 8							
Лист 9							
Лист 10							
Лист 11							
Лист 12							
Лист 13							
Лист 14							
Лист 15							
Лист 16							
Лист 17							
Лист 18							
Лист 19							
Лист 20							
Лист 21							
Лист 22							
Лист 23							
Лист 24							
Лист 25							
Лист 26							
Лист 27							
Лист 28							
Лист 29							
Лист 30							
Лист 31							
Лист 32							
Лист 33							
Лист 34							
Лист 35							
Лист 36							
Лист 37							
Лист 38							
Лист 39							
Лист 40							
Лист 41							
Лист 42							
Лист 43							
Лист 44							
Лист 45							
Лист 46							
Лист 47							
Лист 48							
Лист 49							
Лист 50							
Лист 51							
Лист 52							
Лист 53							
Лист 54							
Лист 55							
Лист 56							
Лист 57							
Лист 58							
Лист 59							
Лист 60							
Лист 61							
Лист 62							
Лист 63							
Лист 64							
Лист 65							
Лист 66							
Лист 67							
Лист 68							
Лист 69							
Лист 70							
Лист 71							
Лист 72							
Лист 73							
Лист 74							
Лист 75							
Лист 76							
Лист 77							
Лист 78							
Лист 79							
Лист 80							
Лист 81							
Лист 82							
Лист 83							
Лист 84							
Лист 85							
Лист 86							
Лист 87							
Лист 88							
Лист 89							
Лист 90							
Лист 91							
Лист 92							
Лист 93							
Лист 94							
Лист 95							
Лист 96							
Лист 97							
Лист 98							
Лист 99							
Лист 100							
Лист 101							
Лист 102							
Лист 103							
Лист 104							
Лист 105							
Лист 106							

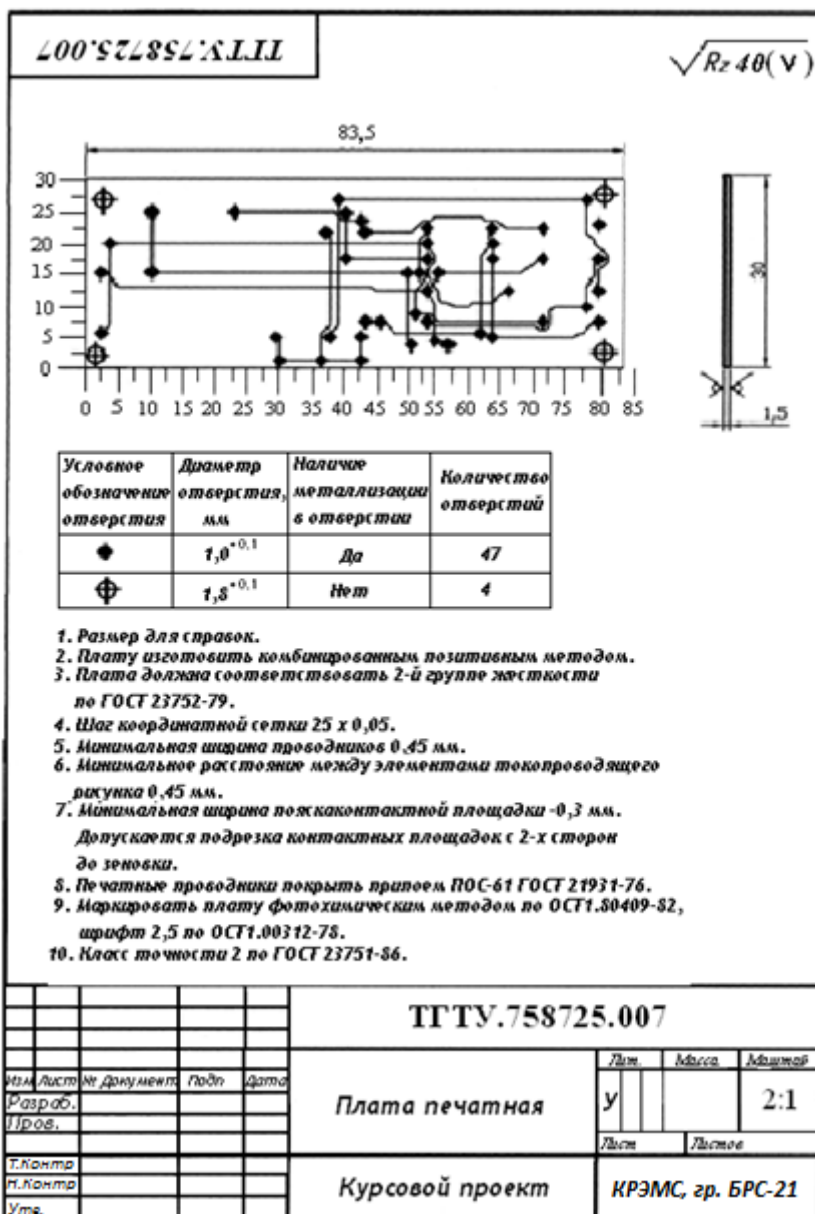
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Е

	Фирма	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
Лист 1					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
					<u>Лампа накаливания</u>		
					Б220-235-60М		
			11		ТУ16.675.178-86	1	ЕL1
Лист 2							
					<u>Микросхема</u>		
					К145АП2		
			12		БК0.347.560-01ТУ	1	DA1
					<u>Предохранитель</u>		
			13		ВП1-1 0Ю0.480.003ТУ-Р	1	FU1
					<u>Резисторы</u>		
					С2-33М±20%		
Лист 3					ШКАБ.434.110.005ТУ		
			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
			21		С2-33М-0,5 5,1 МОм	2	R1,R2
			22		С2-33М-1 1 кОм	1	R8
Лист 4							
Изм/Лист						N докум.	
						Подп.	
						Дата	
						Лист	
						2	

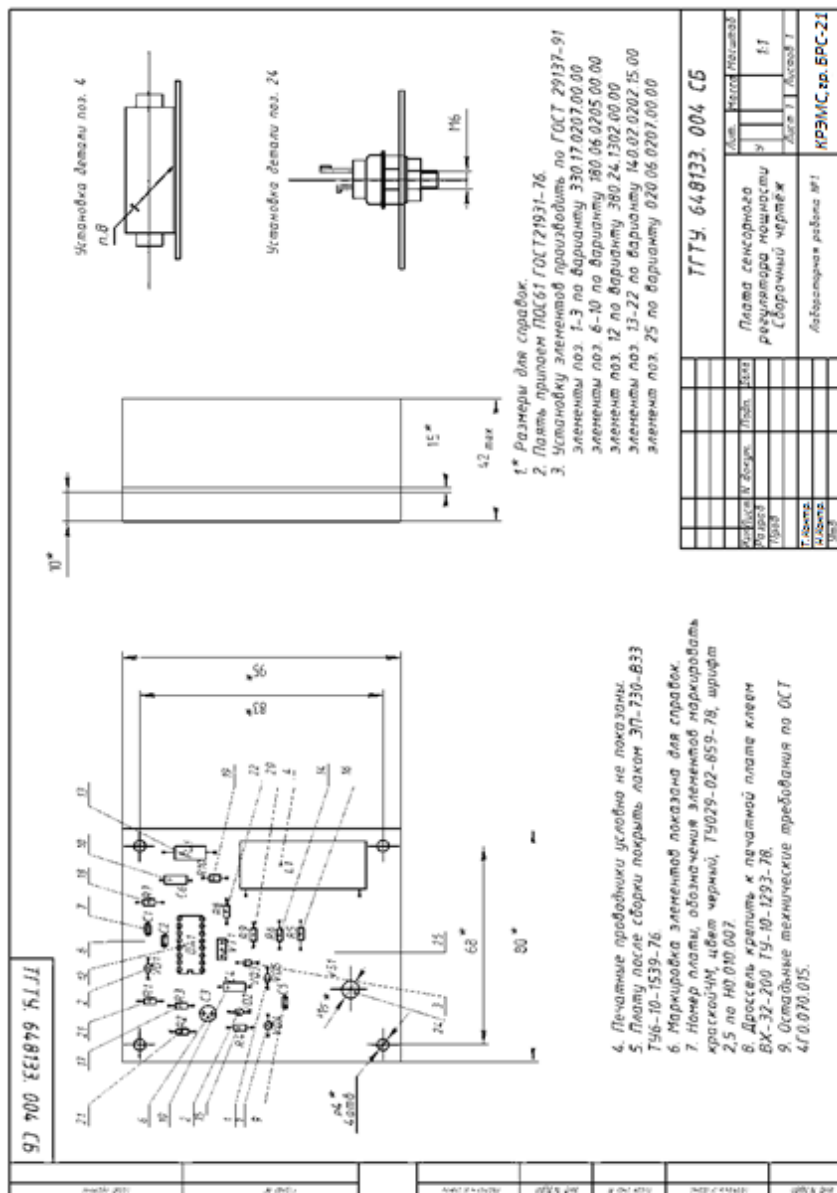
ТГТУ. 648133. 004

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Печатная плата



Приложение 3 Сборочный чертеж печатной платы



**Рекомендуемая форма
информационно-удостоверяющего листа**

118

ПРИЛОЖЕНИЕ К

Перечень документов для передачи в архив кафедры КРЭМС

№ п/п	Название документа	Обозначение документа	Количество штук	Количество листов
1	Курсовой проект на CD-R диске	ТГТУ. 468362.010 ДЭ	1	–
2	Информационно- удостоверяющий лист	ТГТУ.468362.010 УЛ	1	8

Курсовой проект сдал
согласно перечню

дата, подпись

Курсовой проект принял
согласно перечню

дата, подпись

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

СПРАВОЧНЫЕ ПАРАМЕТРЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Электрические параметры биполярного транзистора *n-p-n* структуры КТ315 А:

- напряжение насыщения база-эмиттер $U_{бэ}$ при $I_k = 20 \text{ мА}$,
 $I_б = 2 \text{ мА}$ - до 1В ;
- напряжения насыщения $U_{кэ}$ при $I_k = 20 \text{ мА}$, $I_б = 2 \text{ мА}$ - до 0,04 В;
- граничная частота коэффициента передачи тока при $U_{кэ} = 10 \text{ В}$;
 $I_k = 1 \text{ мА}$ - от 250 МГц;
- статистический коэффициент передачи тока при $U_{кэ} = 10 \text{ В}$;
 $I_k = 1 \text{ мА}$ - 30...120;
- постоянная времени цепи обратной связи при $U_{кб} = 10 \text{ В}$;
 $I_э = 5 \text{ мА}$ - до 300 пс;
- обратный ток коллектора при $U_{кб} = 10 \text{ В}$; - до 1мкА;
- обратный ток эмиттера при $U_{эб} = 5 \text{ В}$ - до 50 мкА;
- емкость коллекторного перехода при $U_{кб} = 10 \text{ В}$; - 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 М

ШКАЛА НОМИНАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЙ РЕЗИСТОРОВ (R)

Таблица М 1. Шкала номинальных значений сопротивлений резисторов

Сопротивления резисторов (R) от 1 Ом до 9,1 ГОм		
Ряд Е6, $\Delta=20\%$	Ряд Е 12, $\Delta=10\%$	Ряд Е 24 $\Delta=5\%$
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

Число из таблицы следует умножить на 10^n для получения номинального значения.

Допустимое отклонение от номинального значения в процентах показано знаком Δ (относительная точность).

Относительная точность для нижеприведенных рядов номинальных значений сопротивлений резисторов:

ряд E48 - $\Delta = \pm 2 \%$;

ряд E96 - $\Delta = \pm 1 \%$;

ряд 192 - $\Delta = \pm 0,5 \%$.

Ряд E48

100	105	110	115	121	127	133	140	147	154	162	169
178	187	196	205	215	226	237	249	261	274	287	301
316	332	348	365	383	402	422	442	464	487	511	536
562	590	619	649	681	715	750	787	825	866	909	953

Ряд E96

100	102	105	107	110	113	115	118	121	124	127	130
133	137	140	143	147	150	154	158	162	165	169	174
178	182	187	191	196	200	205	210	215	221	226	232
237	243	249	255	261	267	274	280	287	294	301	309
316	324	332	340	348	357	365	374	383	392	402	412
422	432	442	453	464	475	487	499	511	523	536	549
562	576	590	604	619	634	649	665	681	698	715	732
750	768	787	806	825	845	866	887	909	931	953	976

Ряд E192

100	101	102	104	105	106	107	109	110	111	113	114
115	117	118	120	121	123	124	126	127	129	130	132
133	135	137	138	140	142	143	145	147	149	150	152
154	156	158	160	162	164	165	167	169	172	174	176
178	180	182	184	187	189	191	193	196	198	200	203
205	208	210	213	215	218	221	223	226	229	232	234
237	240	243	246	249	252	255	258	261	264	267	271
274	277	280	284	287	291	294	298	301	305	309	312
316	320	324	328	332	336	340	344	348	352	357	361
365	370	374	379	383	388	392	397	402	407	412	417
422	427	432	437	442	448	453	459	464	470	475	481
487	493	499	505	511	517	523	530	536	542	549	556
562	569	576	583	590	597	604	612	619	626	634	642
649	657	665	673	681	690	698	706	715	723	732	741
750	759	768	777	787	796	806	816	825	835	845	856
866	867	887	898	909	920	931	942	953	965	976	988

ПРИЛОЖЕНИЕ Н

ШКАЛА НОМИНАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЕМКОСТЕЙ КОНДЕНСАТОРОВ (С) В МИКРОФАРАДАХ

Таблица Н 1. Шкала номинальных значений емкостей конденсаторов

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	

Установлено семь определенных рядов международной электротехнической комиссией для значений номинальной емкости: E3; E6; E12; E24; E48; E96; E192.

Номинальные емкости соответствуют числам декады и числам, полученным путем их умножения и деления на 10^n , где n - целое положительное или отрицательное число. В производстве конденсаторов в основном применяют ряды ЕЗ, Е6, Е12, Е24.

Цифры после буквы Е указывают на число номинальных значений в каждом десятичном интервале (декаде).

Таблица Н 2. Шкала номинальных значений емкостей конденсаторов

Е24	Е12	Е6	ЕЗ	Е24	Е12	Е6	ЕЗ
1,0	1,0	1,0	1,0	3,3	3,3	3,3	
1,1				3,9	3,9		
1,2	1,2			4,3			
1,3				4,7	4,7	4,7	4,7
1,5	1,5	1,5	1,5	5,1			
1,6				5,6	5,6		
1,8	1,8			6,2			
2,0				6,8	6,8	6,8	
2,2	2,2	2,2	2,2	7,5			
2,4				8,2	8,2		
2,7	2,7			9,1			
3,0							

Таблица Н 3. Шкала номинальных значений емкостей конденсаторов

E192	E96	E48	E192	E96	E48	E192	E96	E48	192	E96	E48
100	100	100	172			309	309		583		
101			174	174		312			583		
102	102		176			316	316	316	590	590	590
104			178	178	178	320			597		
105	105	105	180			324	324		604		
106			182	182		328			612		
107	107		184			348	348	348	619	619	619
109			187	187	187	352			626		
110	110	110	189			357	357		634	634	
111			191	191		361			642		
113	113		193			365	365	365	649	649	649
114			196	196		370			657		
115	115	115	198			374			665		
117			200	200		379			673		
118	118		203			383	383	383	681	681	681
120			205	205	205	388			690		
121	121	121	208			392	392		698	698	
123			210	210		397			706		
124	124		213			402	402	402	750	750	750
125			215	215	215	407			759		
127	127	127	218			412			768	768	
129			221	221		417			777		
130	130		223			422	422	422	787	787	787
132			237	237	237	427			796		
133	133	133	240			432	432		806	806	
135			243			437			816		

137			246			442	442	442	825	825	825
138			249	249	249	448			835		
140	140	140	252			453	453		845		
142			255			459			845	845	
143			258			464	464	464	856		
145			26*	261	261	470			866	866	866
147	147	147	264			475	475		876		
149			267	267		481			887	887	
150	150		271			511	511	511	898		
152			274	274	274	517			909	909	909
154	154	154	277			523	523		920		
156			280	280		530			931	931	
158	158		284			536	536	536	942		
160			287	287	287	542			953	953	953
162	162	162	291			549	549		965		
164			294	294		556			976	976	
165	165		298			562	562	562	988		
167			301	301	301	509					
169	169	169	305			576	576				

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

2. КОМПЕТЕНЦИИ, ФОРМИРУЕМЫЕ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА» В РАМКАХ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

3. СХЕМОТЕХНИКА БИПОЛЯРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

- 3.1. Принцип действия и устройство биполярных транзисторов
 - 3.1.1. Структура и режимы работы биполярных транзисторов
 - 3.1.2. Схемные варианты включения биполярных транзисторов
 - 3.1.3. Динамические и статические характеристики биполярных транзисторов
 - 3.1.4. Схемы эквивалентные биполярных транзисторов
- 3.2. Принцип действия и устройство полевых транзисторов
 - 3.2.1. Классификация и обозначение полевых транзисторов на схемах
 - 3.2.2. Полевые транзисторы с управляющим p - n - переходом
 - 3.2.3. Полевые транзисторы с изолированным затвором
- 3.3. Классификация и маркировка биполярных и полевых транзисторов

4. СХЕМОТЕХНИКА УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ТРАНЗИСТОРАХ

- 4.1. Структура и классификация усилителей
- 4.2. Параметры и характеристики усилителя
- 4.3. Принципиальные электрические схемы усилительного каскада на биполярном транзисторе при постоянном и переменном токе
 - 4.3.1. Построение рабочей точки усилителя и методы ее стабилизации
- 4.4. Принципиальная электрическая схема усилительного каскада на полевом транзисторе

5. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ (РАБОТУ)

- 5.1. Тема и исходные данные для курсового проекта (работы)
- 5.2. Содержание и объем курсового проекта (работы)
- 5.3. Правила оформления курсового проекта (работы)

6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

- 6.1. Методические рекомендации и этапы выполнения курсового проекта (работы)
 - 6.1.1. Разработка принципиальной электрической схемы усилительных каскадов на биполярных транзисторах при курсовом проектировании

6.2. Пример расчета однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе по схеме с общим эмиттером.

6.2.1. Исходные данные, порядок расчета и построения частотных характеристик усилителя

6.2.2. Методика расчета усилителя по постоянному току

6.2.3. Методика расчета усилителя по переменному току

6.2.4. Методика построения частотных характеристик усилителя

6.2.5. Методика оценки искажений усилителя

7. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА КОМПЬЮТЕРЕ

7.1. Описание и применение программы Electronics Workbench

8. МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ, ИЗГОТОВЛЕНИЯ

МАКЕТА УСИЛИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ И ЕГО НАСТРОЙКА

8.1. Разработка и изготовление макета усилителя на биполярном транзисторе

8.2. Освоение методики настройки усилителя в соответствии с заданием на курсовое проектирование

9. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ (РАБОТУ)

10. ЗАЩИТА КУРСОВОГО ПРОЕКТА (РАБОТЫ)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ КУРСОВОГО ПРОЕКТА (РАБОТЫ)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ (РАБОТУ)

ПРИЛОЖЕНИЕ В. ВЕДОМОСТЬ КУРСОВОГО ПРОЕКТА (РАБОТЫ)

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. ПЕРЕЧЕНЬ ЭЛЕМЕНТОВ К ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЕ УСИЛИТЕЛЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ТРЕХКАСКАДНОГО УСИЛИТЕЛЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. СПЕЦИФИКАЦИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. ПЕЧАТНАЯ ПЛАТА

ПРИЛОЖЕНИЕ З. СБОРОЧНЫЙ ЧЕРТЕЖ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

ПРИЛОЖЕНИЕ И. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ФОРМА ИНФОРМАЦИОННО-УДОСТОВЕРЯЮЩЕГО ЛИСТА

ПРИЛОЖЕНИЕ К. ПЕРЕЧЕНЬ ДОКУМЕНТОВ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ В АРХИВ КАФЕДРЫ КРЭМС

ПРИЛОЖЕНИЕ Л. СПРАВОЧНЫЕ ПАРАМЕТРЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

ПРИЛОЖЕНИЕ М. ШКАЛА НОМИНАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЙ РЕЗИСТОРОВ

ПРИЛОЖЕНИЕ Н. ШКАЛА НОМИНАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЕМ- КОСТЕЙ КОНДЕНСАТОРОВ

Учебное издание

Электроника и схемотехника

Учебное пособие

Редактор

Инженер по компьютерному макетированию

Подписано в печать .2023.

Формат усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ №