

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФГБОУ ВО «ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В.В. Горбатенко

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ И КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«СХЕМОТЕХНИКА АНАЛОГОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ  
УСТРОЙСТВ»

Утверждено учебно-методическим советом  
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2017

УДК 621.38(075.8)

ББК 32.85Я7

Горбатенко В.В. Практические занятия и курсовое проектирование по дисциплине «Схемотехника аналоговых электронных устройств»: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые, граф. данные (5,5 Мб) / В.В. Горбатенко. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) – Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024x768; Adobe Acrobat; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана.

Пособие предназначено для проведения практических занятий и курсового проектирования по дисциплине «Схемотехника аналоговых электронных устройств», приведен краткий теоретический курс, даны индивидуальные варианты по темам занятий с методическими рекомендациями и примерами выполнения.

Издание соответствует рабочей программе дисциплины «Схемотехника аналоговых электронных устройств» для студентов направления подготовки 11.03.01 «Радиотехника» очной формы обучения.

Табл. 33.; Ил. 27. Библиогр.: 20 назв.

Рецензенты: лаборатория АО научного конструкторско-технологического бюро «Феррит»  
(начальник лаборатории, канд. техн. наук В.В. Блинов);  
д-р физ.-мат. наук, проф. Л.Н. Коротков.

© Горбатенко В.В., 2017

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017

## ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с государственными требованиями, предъявляемыми к уровню подготовки специалистов по направлению подготовки 11.03.01 «РАДИОТЕХНИКА», студенты в результате изучения дисциплины «Схемотехника аналоговых электронных устройств» должны знать:

- основные технические показатели и характеристики аналоговых электронных устройств;
- принципы усиления сигналов, построения усилителей и обратной связи в усилителях;
- схемотехнику многокаскадных усилителей, каскадов предварительного усиления, оконечных усилительных каскадов, широкополосных и импульсных усилителей;
- схемотехнику функциональных устройств на операционных усилителях, устройств перемножения и усиления сигналов, активных RC-фильтров;
- схемотехнику RC-генераторов гармонических колебаний;
- схемотехнику аналого-цифровых устройств;
- основы компьютерного анализа и проектирования аналоговых устройств.

Студенты должны уметь:

- обосновывать выбор элементной базы для создания малогабаритных, надежных и экономичных устройств для радиотехнических средств передачи, приема и обработки сигналов, соответствующих современному уровню развития науки и техники;
- осуществлять расчет аналоговых и аналого-цифровых устройств с учетом требований технического задания;
- проектировать аналоговые и аналого-цифровые устройства связи с учетом энергетической целесообразности, электромагнитной совместимости и сопряжения параметров с общими параметрами системы.

Для успешного усвоения материала дисциплины необходимо знание основных вопросов, излагаемых в курсах "Математика", "Физика", "Электроника", "Основы теории цепей". Содержание дисциплины обеспечивает базу для освоения специальных дисциплин «Радиопередающие устройства», «Радиоприемные устройства».

Ограниченный объем дисциплины предполагает активную самостоятельную работу по изучению и углублению знаний отдельных тем дисциплины.

Целью данного пособия является оказание помощи студентам 3 курса направления подготовки 11.03.01 «РАДИОТЕХНИКА» очной формы обучения в достижении уровня требований, предписываемого Государственным стандартом.

# 1. СТРУКТУРА КУРСОВОГО ПРОЕКТА

## 1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

В данном разделе даны общие термины и понятия, относящиеся к проектно-конструкторской работе.

**Изделие** – любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии.

**Проектирование радиоэлектронной аппаратуры (РЭА)** – процесс создания проекта – прототипа, прообраза предполагаемого или возможного объекта. **Проектирование радиоэлектронного устройства (РЭУ)** – разработка проектной и конструкторской документации, предназначенной для создания новых видов и образцов РЭУ.

Определение термина проектирование отражает две его особенности. Во-первых, в процессе проектирования предполагаемый объект еще не материализуется, а создается лишь его прообраз на другой материальной основе (чертежи и другие документы). Во-вторых, изготовленное по проекту изделие в силу ряда причин (для РЭУ, например, из-за недостаточной точности математических моделей и др.) оказывается неадекватным предполагаемому (задуманному) и, следовательно, является лишь его прототипом.

**Конструирование** – процесс отражения в чертежах структуры, размеров, формы, материалов, обработки и связей (внутренних и внешних) будущего изделия.

Рассмотрим подробнее понятия проектирование и конструирование. При их определении обычно возникают трудности. Часто процесс проектирования называют конструированием, а иногда и наоборот. Такое положение объясняется пересечением этих понятий, что схематично отображено на рис. 1.1. На начальной стадии проектирования изделия, конструкторских работ, т.е. процесса конструирования, нет.



Рис. 1.1. Схема взаимосвязи процессов проектирования и конструирования

Позднее в составе проектных работ появляется конструирование, которое продолжается и после окончания проектирования, как стадия разработки

рабочей конструкторской документации. Таким образом, разработка структурной и принципиальной схем относится к чисто проектным процедурам, а сами схемы – к проектным документам. Разработка чертежа общего вида изделия – пример конструирования при проектировании изделия – может быть названа проектированием или конструированием, а чертеж общего вида – проектным или конструкторским документом. Но разработка чертежа – это конструкторская процедура, и рабочий чертеж относится только к конструкторским документам.

Следовательно, на одних стадиях разработки термины проектирование и конструирование – синонимы, а на других их смешение недопустимо.

**Пояснительная записка** – документ, содержащий описание устройства и принципа действия разрабатываемого изделия, а также обоснование принятых при его разработке технических и технико-экономических решений.

**Схема** – документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними.

## 1.2. СТАДИИ РАЗРАБОТКИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Существуют следующие стадии промышленной разработки изделий: техническое предложение; эскизный проект, технический проект, рабочая конструкторская документация.

**Техническое предложение** – совокупность проектных документов, содержащих обоснование целесообразности разработки изделия на основе анализа технического задания (ТЗ) и различных вариантов возможных решений изделия, сравнительной оценки решений с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей разрабатываемого и существующих изделий, а также патентных исследований.

Этапы работы: подбор материалов, разработка технического предложения с присвоением документам литеры «П», утверждение технического предложения.

**Эскизный проект** – совокупность конструкторских документов, которые содержат принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия, а также данные, определяющие его назначение, основные параметры и габаритные размеры. Этапы работы: разработка проекта с присвоением документам литеры «Э», изготовление и испытание макетов (при необходимости), утверждение проекта.

**Технический проект** – совокупность конструкторских документов, которые содержат окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве изделия, и исходные данные для разработки рабочей документации. Этапы работы: разработка проекта с присвоением

документам литеры «Т», изготовление и испытание макетов (при необходимости), утверждение проекта.

Технический проект служит основанием для разработки рабочей конструкторской документации, которая содержит необходимые данные для изготовления, испытания, приемки, эксплуатации, транспортирования и хранения изделия.

Разработка **рабочей документации** сочетается с изготовлением по ней последовательно опытных образцов, опытных партий и установочной серии, по результатам испытаний которых проводится корректировка конструкторской документации.

Допускается исключать стадии эскизного или технического проектирования и вести разработку по схемам: техническое предложение – технический проект – рабочая документация, техническое предложение – эскизный проект – рабочая документация.

Указанные стадии определяют наиболее целесообразную организацию проектирования, делят его на уровни. От стадии к стадии объем и стоимость проектных работ увеличиваются, разработка становится все детальнее, все шире определяются различные стороны и свойства РЭА. Можно сказать, деление на стадии изображает проектирование «по вертикали», поскольку базой для каждой последующей стадии разработки служит предыдущая.

Условное деление процесса создания РЭУ на три основных этапа: системотехническое проектирование, схемотехническое проектирование и конструкторское проектирование – отражает последовательное изменение содержания проектных процедур. Это «горизонтальная» схема процесса создания РЭУ (рис. 1.2).

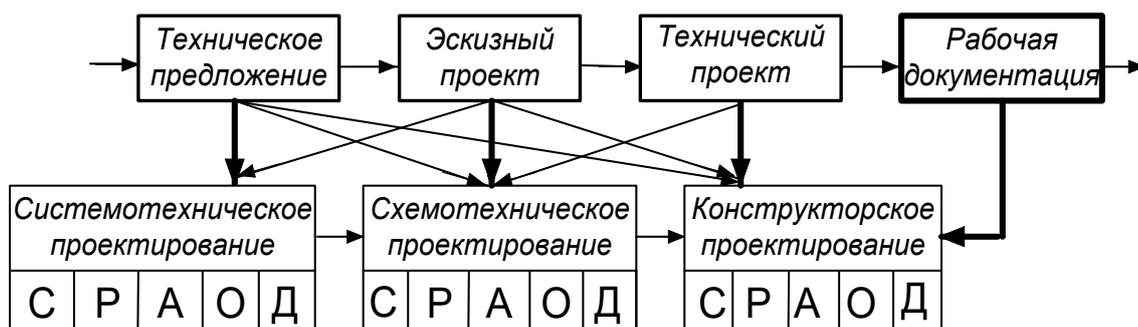


Рис. 1.2 Схема последовательности разработки РЭА

Этапы, характерные для каждой стадии, показаны толстой стрелкой. Тонкой стрелкой показано обращение к процедурам других этапов. Например, на стадии технического предложения главным является разработка рациональной структуры, но эта задача не может быть решена без выбора наиболее важных в принципиальном отношении схем, элементной базы, без определения контуров конструкции.

Как показано на схеме, каждый этап включает последовательное выполнение процедур синтеза С, расчета Р, анализа А, оптимизации О, выпуска технической документации Д. Проектирование на каждом этапе может иметь итерационный характер, т.е. возможно неоднократное возвращение к предыдущим процедурам этапа, если технические требования не удовлетворены. Итерационный характер могут иметь отдельные процедуры, например расчеты.

### **1.3. СТАДИИ РАЗРАБОТКИ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

Стадии и этапы проектирования организационно расчленяют и закрепляют выработанной практикой наиболее логичный путь создания проекта нового промышленного изделия. Естественно, разработка курсового проекта неизбежно ведется тем же путем и по той же схеме (рис. 1.2), что и проектировании промышленного изделия.

Так как объектом курсового проектирования является радиоэлектронное устройство, а не готовое изделие, то курсовое проектирование завершается на стадии эскизного проектирования, т.е. оно содержит только стадии технического предложения и эскизного проекта.

На рис. 1.2 видно, что основным содержанием указанных стадий является системотехническое и схемотехническое проектирование. Но стадия технического предложения предусматривает «...сравнительную оценку решений с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей...», а стадия эскизного проекта – разработку «...документов, которые содержат принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия...», поэтому курсовой проект обычно тоже содержит элементы конструкторского проектирования.

Примерный перечень работ и документов, выполняемых на каждой стадии проектирования, показан в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Примерный перечень работ и документов, выполняемых на каждой стадии проектирования

Стадия	Этап проектирования	Перечень работ	Документ с результатами работ
Техническое предложение	Системотехнический	1. Подбор и изучение литературы	Пояснительная записка
	«	2. Составление обзора по литературным источникам	То же
	«	3. Анализ технического задания	«
	«	4. Разработка структурной схемы	Структурная схема
	Схемотехнический	5. Выбор элементной базы	Пояснительная записка
Эскизный проект	Схемотехнический	6. Дополнение принципиальной схемы элементами управления, контроля и защиты	Пояснительная записка
	«	7. Расчет параметров элементов схемы	То же
	«	8. Составление перечня элементов схемы	Принципиальная схема
	«	9. Другие расчеты (если указаны в ТЗ)	Пояснительная записка
	Конструкторский	10. Разработка печатной платы	Чертежи детали
	«	11. Разработка ячейки (если указана в ТЗ)	Сборочный чертеж
	«	12. Компоновка электронного устройства	Чертеж общего вида
	«	13. Разработка таблицы составных частей изделия	Пояснительная записка или чертеж общего вида

## **1.4. СОСТАВ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

Входящие в курсовой проект документы следует оформлять в строгом соответствии с требованиями Единой Системы Конструкторской Документации (ГОСТ 2.00-93). Единая система конструкторской документации (ЕСКД) - это комплекс государственных стандартов, который устанавливает взаимосвязанные правила, требования и нормы по разработке, оформлению и обращению конструкторской документации, разрабатываемой и применяемой на всех стадиях жизненного цикла изделия (при проектировании, разработке, изготовлении, контроле, приёмке, эксплуатации, ремонте, утилизации).

В состав курсового проекта входит пояснительная записка объемом 35 страниц машинописного текста и 5 листов формата А3 со схемами и чертежами.

## **1.5. РАЗДЕЛЫ, ЧЕРТЕЖИ И ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

### **1.5.1. РАЗДЕЛЫ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ И ЧЕРТЕЖИ ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

Пояснительная записка является конструкторским документом и должна соответствовать требованиям ЕСКД (ГОСТ 2.105 - 95 «Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам»).

Пояснительная записка (ПЗ) курсового проекта обычно содержит следующие разделы:

- 1) титульный лист;
- 2) реферат;
- 3) содержание;
- 4) введение (обзор радиоэлектронных устройств данного класса по литературным источникам);
- 5) анализ технического задания и синтез структурной и функциональной схем РЭУ;
- 6) разработка принципиальной схемы РЭУ;
- 7) электрический расчет РЭУ;
- 8) компоновка печатного узла и всего РЭУ;
- 9) приложения;
- 10) список литературы.

ПЗ может быть дополнена за счет сокращения объема некоторых других разделов одним из таких разделов: 1) расчет одной или нескольких электрических характеристик; 2) расчет надежности устройства или его частей; 3) расчет температурной стабильности устройства или его частей; 4) расчет точности параметров устройства или его частей; 5) анализ рассчитанной схемы или части на ЭВМ.

Графическая часть ПЗ - ВАХ, нагрузочные прямые, спецификации, рисунки, встречающиеся в тексте, оформляются в соответствующем графическом редакторе и входят в состав раздела 9 ПЗ - приложения.

Графическая часть курсового проекта обычно включает следующие чертежи:

1. Чертеж схемы электрической структурной (А3);
2. Чертеж схемы электрической функциональной (А3);
3. Чертеж схемы электрической принципиальной (А3);
4. Чертеж печатной платы (А3);
5. Чертеж печатного узла (А3).

### **1.5.2. ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ**

На **титульном листе** приводят следующие сведения:

наименование университета;

наименование работы;

фамилии и инициалы исполнителей курсового проекта, руководителей курсового проекта;

дата составления ПЗ.

Подписи и даты подписания должны быть выполнены только черными чернилами или тушью. Дата оформляется арабскими цифрами в следующей последовательности: день месяца, месяц, год. День месяца и месяц оформляются двумя парами арабских цифр, разделенными точкой; год – четырьмя арабскими цифрами. Например, дату 10 апреля 2017 г. следует оформлять: 10.04.2017.

Допускается словесно-цифровой способ оформления даты, например: 10 апреля 2017 г. Допускается также оформление даты в следующей последовательности: год, месяц, день месяца, например, 2017.04.10.

Должности, ученые степени, ученые звания руководителей курсового проекта (если печатается в несколько строк, то печатать через 1 межстрочный интервал), затем оставляют свободное поле для личных подписей и помещают инициалы и фамилии лиц, подписавших отчет, в одной строке с подписями проставляют даты подписания.

Пример оформления титульного листа приведен в приложении 1.

**Реферат** должен содержать:

1) сведения об объеме пояснительной записки, количестве иллюстраций, таблиц, приложений, количестве использованных источников, а также сведения об объеме графической части курсового проекта;

2) текст реферата.

Текст реферата должен отражать:

1) объект разработки;

2) цель работы;

3) методы проведения работы;

4) результаты работы и их новизну;

5) основные конструктивные, технологические и технико-

эксплуатационные характеристики;

- б) степень внедрения;
- 7) область применения;

**Содержание** включает введение, наименование всех разделов, подразделов, пунктов (если они имеют наименование), заключение, список использованных источников и наименование приложений с указанием номеров страниц, с которых начинаются эти элементы пояснительной записки.

Слово «Содержание» записывают в виде заголовка (симметрично тексту) с прописной буквы. Наименования, включенные в содержание, записывают строчными буквами, начиная с прописной буквы.

**Введение** должно содержать цели и задачи разработки конструкции, оценку современного состояния разработки аналогов данного проекта, сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки, о патентных исследованиях и выводы из них. Во введении должны быть показаны актуальность и новизна разработки.

**Заключение** должно содержать:

- 1) краткие выводы по результатам проектирования в целом или отдельных его этапов;
- 2) оценку полноты решений поставленных задач;
- 3) разработку рекомендаций и исходных данных по конкретному использованию результатов разработки.

В конце текстового документа допускается приводить **список литературы**, которая была использована при его составлении. Выполнение списка и ссылки на него в тексте – по ГОСТ 7.32. Список литературы включают в содержание документа.

Каждый раздел ПЗ следует начинать с нового листа. Заголовки разделов должны быть краткими и оформляются прописными буквами без переноса слов симметрично тексту. Заголовки подразделов пишут с абзаца (15-17 мм) строчными буквами (кроме первой прописной). Точку в конце заголовка не ставят и не подчеркивают. Заголовки от текста выделяются интервалом 15 мм.

Страницы ПЗ нумеруются арабскими цифрами. Номер ставится в правом верхнем углу. Титульный лист включают в общую нумерацию, но номер на нем не ставят. Образец оформления титульного листа курсового проекта приведен в разделе 6 (приложение 1).

Разделы должны иметь порядковую нумерацию в пределах ПЗ и обозначаться арабскими цифрами с точкой в конце.

Подразделы нумеруются цифрами в пределах каждого раздела. Номер подраздела состоит из номера раздела и подраздела, разделенных точкой.

Рисунки размещаются после первого упоминания о них в тексте, должны иметь наименование, которое помещают под рисунком. Рисунки, размер которых больше формата А4, складывают до формата ПЗ и учитывают как одна страница.

При выполнении расчетов в формулу необходимо подставить значения символов и коэффициентов в той последовательности, в которой они приведены в формуле и привести результат вычислений.

Список используемых источников должен содержать перечень источников, используемых при выполнении проекта. Источники следует располагать в алфавитном порядке.

Приложения оформляют как продолжение ПЗ, располагая их в порядке появления ссылок на них в тексте.

### **1.5.3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ТЕКСТОВЫХ ДОКУМЕНТОВ**

Текстовые документы ПЗ выполняют машинописным способом. Шрифт должен быть четким, высотой не менее 2,5 мм, только черного цвета (кегель не менее 12 с полуторным интервалом).

Расстояние от рамки формы (по ГОСТ 2.105-95) до границ текста в начале и в конце строк – не менее 3 мм. Расстояние от верхней или нижней строки текста до верхней или нижней рамки должно быть не менее 10 мм. При выполнении ПЗ без рамки по ГОСТ 2.104 необходимо соблюдать следующие размеры полей: правое – не менее 10 мм, верхнее и нижнее – не менее 20 мм, левое – не менее 30 мм.

Абзацы в тексте начинают отступом, равным 15 – 17 мм.

Опечатки, описки и графические неточности, обнаруженные в процессе выполнения документа, допускается исправлять подчисткой или закрашиванием белой краской и нанесением на том же месте исправленного текста (графики) машинописным способом или черными чернилами, пастой или тушью рукописным способом.

Вне зависимости от способа выполнения ПЗ качество напечатанного текста и оформления иллюстраций, таблиц, распечаток с ПЭВМ должно удовлетворять требованию их четкого воспроизведения.

При выполнении ПЗ необходимо соблюдать равномерную плотность, контрастность и четкость изображения по всей ПЗ. Должны быть четкие, нерасплывшиеся линии, буквы, цифры и знаки.

Повреждения листов текстовых документов, помарки и следы неполностью удаленного прежнего текста (графики) не допускается.

Сокращение русских слов и словосочетаний в ПЗ – по ГОСТ 7.12 - 93.

## 2. ПРИМЕР ВАРИАНТА ЗАДАНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

### 2.1. ПРИМЕР ВАРИАНТА ЗАДАНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА УСИЛИТЕЛЯ

Таблица 2.1

Номер варианта курсового проекта и исходные данные для его выполнения вносятся в соответствующие ячейки таблицы в соответствии с индивидуальным заданием на курсовой проект

№ варианта	$U_{вх}, 10^{-3}В$	$R_{вх}, 10^3 Ом, не менее$	Частоты среза АЧХ				К <sub>и</sub> , дБ в полосе пропускания	$R_{н}, Ом$	$R_{н}, ВА$	$U_{н}, В$	Режим работы транзистора	
			Форма АЧХ	$f_1, Гц$	$f_2, Гц$	$f_3, кГц$						$f_4, кГц$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
00		25	Рис. 2.1	10	130	16			50	0,35		В

Форма логарифмической амплитудно – частотной характеристики (ЛАЧХ) разрабатываемого усилителя нижних частот (УНЧ) определяется в соответствии с номером рисунка, указанного в п. 5.1 варианта задания курсового проекта.

### 2.2. ВАРИАНТЫ ФОРМЫ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК (АЧХ) УНЧ

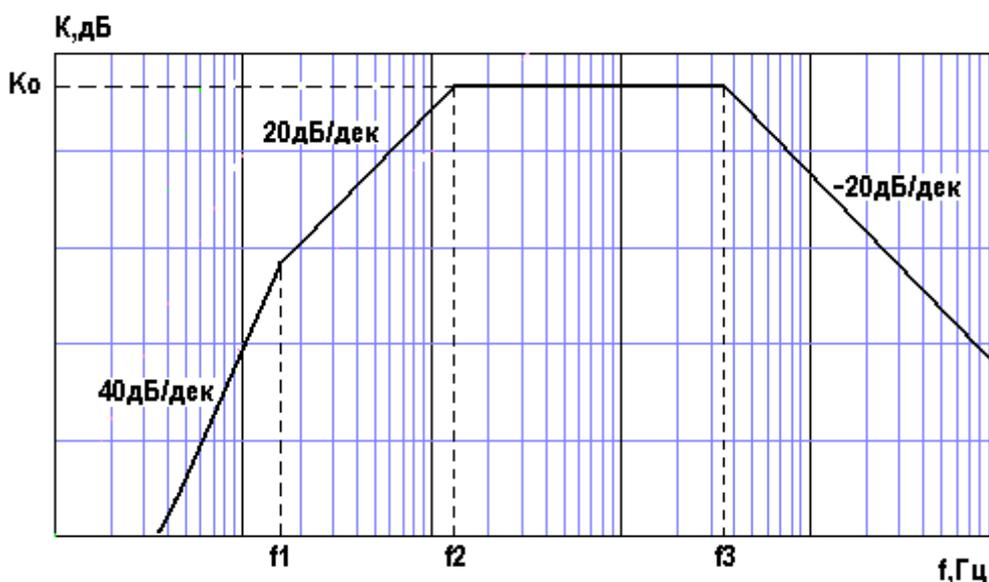


Рис. 2.1. АЧХ

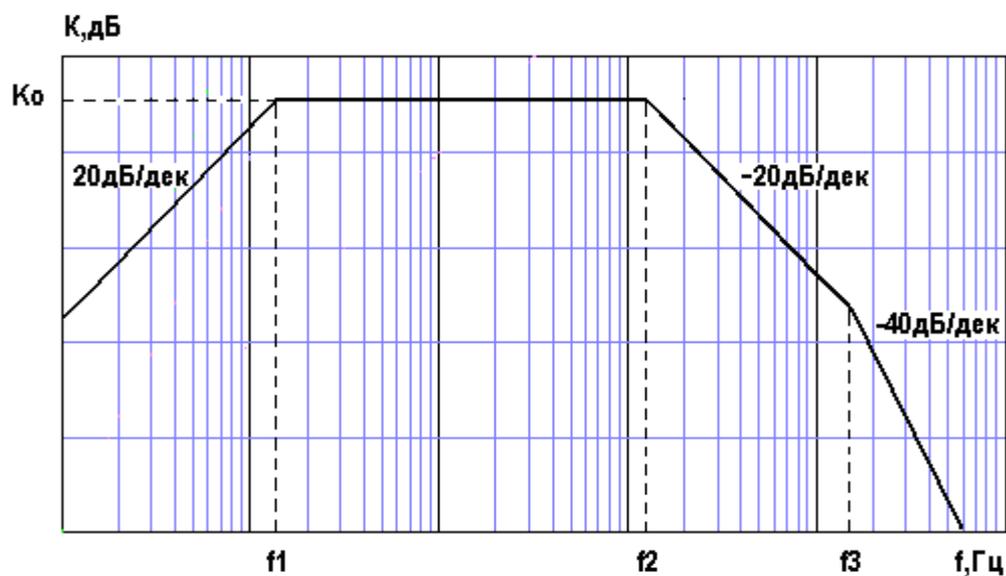


Рис. 2.2. АЧХ

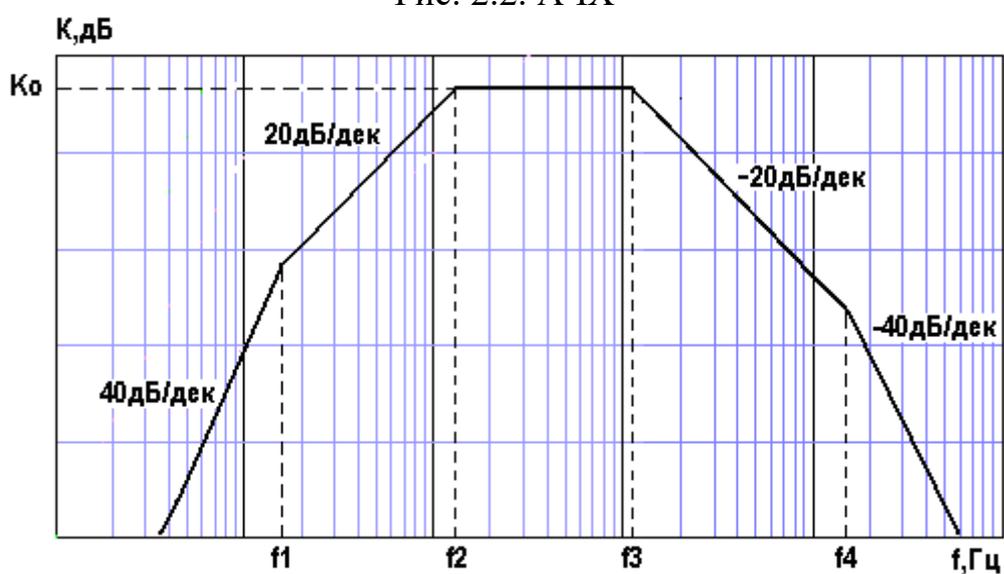


Рис. 2.3. АЧХ

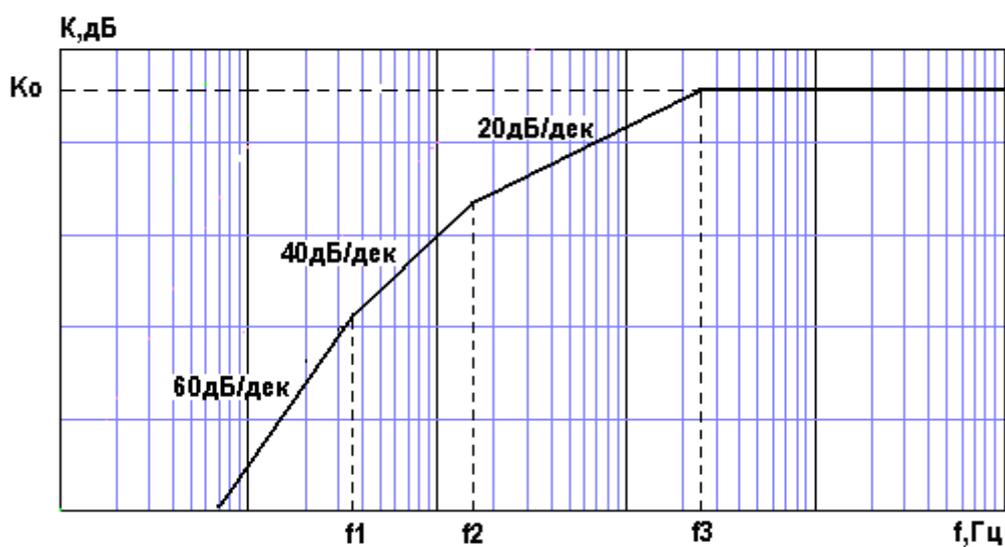


Рис. 2.4. АЧХ

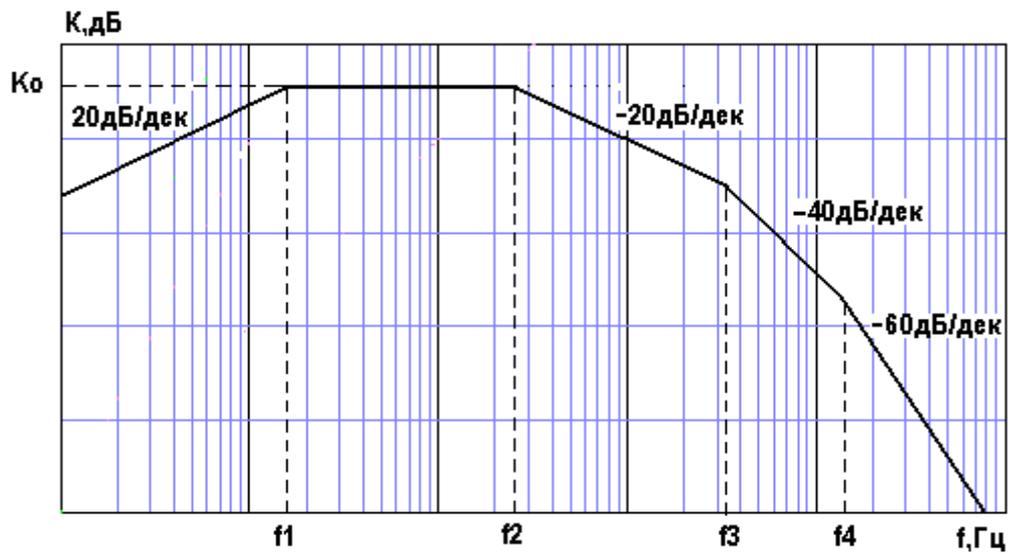


Рис. 2.5. АЧХ

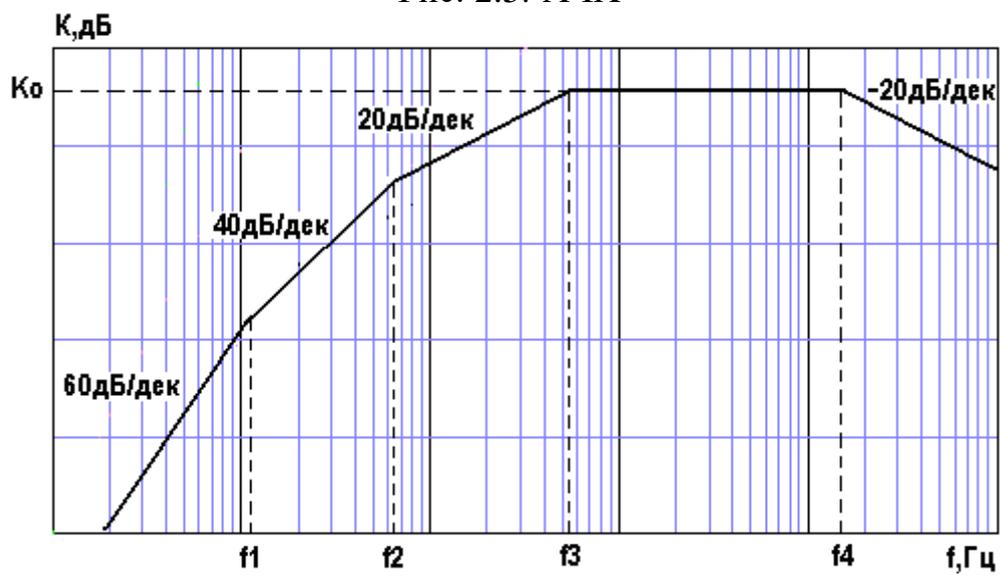


Рис. 2.6. АЧХ

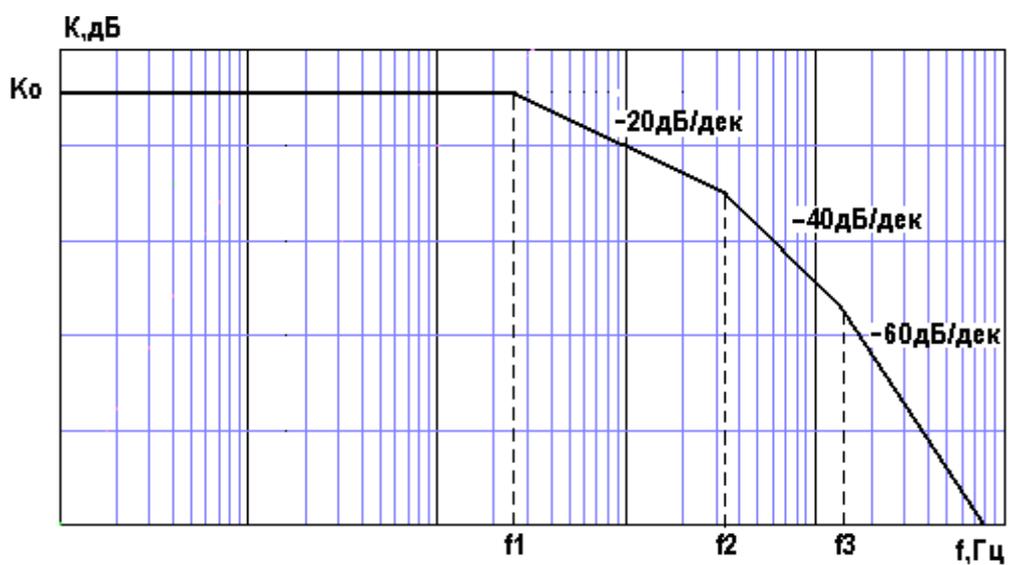


Рис. 2.7. АЧХ

### 3. СИНТЕЗ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРНОЙ И СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО УСТРОЙСТВА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

#### 3.1. СИНТЕЗ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРНОЙ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО УСТРОЙСТВА

Для обеспечения заданных параметров разрабатываемого устройства (вариант № 00) выбираем следующие принципы построения схемы электрической структурной:

1. Формирование амплитудно-частотной характеристики разрабатываемого устройства обеспечивается активными RC-фильтрами первого порядка высоких частот (ФВЧ) с частотами среза  $f_1$  и  $f_2$  и активным RC-фильтром низких частот (ФНЧ) с частотой среза  $f_3$ ;

2. Требуемое значение мощности в нагрузке обеспечивается выходным услителем мощности (УМ), который состоит из предварительного и окончного каскадов;

3. Требуемое значение входного сопротивления усилителя обеспечивается входным каскадом;

4. Коэффициент усиления по напряжению УНЧ равномерно распределяется между входным каскадом, каскадом предварительного усиления и тремя каскадами активных фильтров.

Схема электрическая структурная УНЧ, синтезированная на основе изложенных принципов, представлена на рис. 3.1.

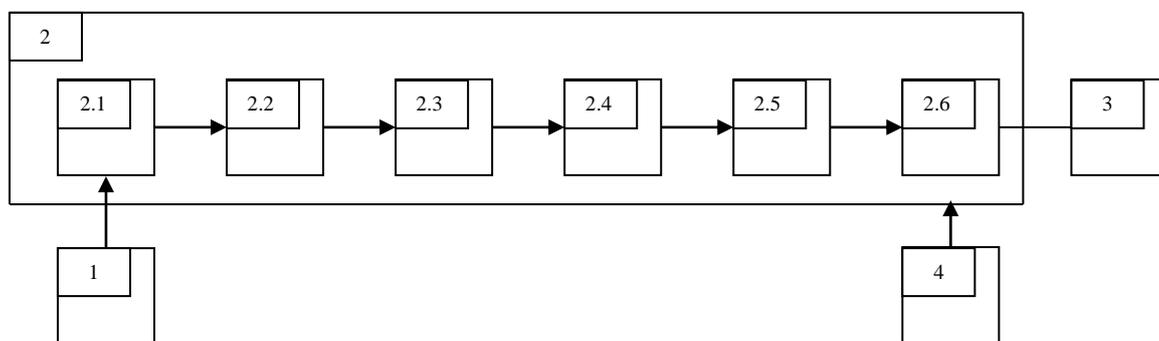


Рис. 3.1. Схема электрическая структурная УНЧ:

1 – источник сигнала; 2 – усилитель; 2.1 – входной каскад; 2.2 - ФВЧ1; 2.3 - ФВЧ2; 2.4 - ФНЧ; 2.5 - предварительный каскад усилителя мощности; 2.6 - окончный каскад усилителя мощности; 3 - нагрузка; 4 - источник питания

### **3.2. СИНТЕЗ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО УСТРОЙСТВА**

Для обеспечения заданного значения мощности в нагрузке выбираем двухтактный выходной каскад на комплементарной паре транзисторов.

Коэффициент усиления по напряжению такого каскада близок к 1, поэтому необходимую амплитуду напряжения обеспечивает предоконечный каскад усилителя мощности (УМ), выполненный на операционном усилителе (ОУ) в инвертирующем включении. Для снижения нелинейных искажений в нагрузке используем отрицательную обратную связь, охватывающую окончательный и предоконечный каскады УМ.

АЧХ УНЧ формируем путем последовательного включения фильтров первого порядка на основе RC цепей и согласующих операционных усилителей. Частоты среза фильтров  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$  рассчитываются в соответствии с техническим заданием. Коэффициенты передачи фильтров в полосе пропускания выбираем равными 1 для согласования каскадов по уровням входных и выходных напряжений и обеспечения устойчивости УНЧ.

В качестве входного каскада используем ОУ в неинвертирующем включении. Требуемое значение коэффициента усиления по напряжению зададим цепью отрицательной обратной связи. Заданное значение входного сопротивления УНЧ обеспечим соответствующим выбором сопротивления резистора подключенного к неинвертирующему входу ОУ. Схема электрическая функциональная УНЧ, синтезированная на основе изложенных принципов, представлена на рис. 3.2.

### **3.3 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ**

Электрический расчет разрабатываемого устройства следует начинать с последнего блока схемы электрической функциональной, т.е. с расчета окончательного каскада.

Результатом расчета окончательного каскада должны быть исходные данные, необходимые для расчета предыдущего каскада - предварительного усилителя, т.е. блока 2.5 схемы электрической функциональной (рис. 3.2) и т.д. Электрический расчет основных фрагментов курсового проекта выполняется студентами на практических занятиях.

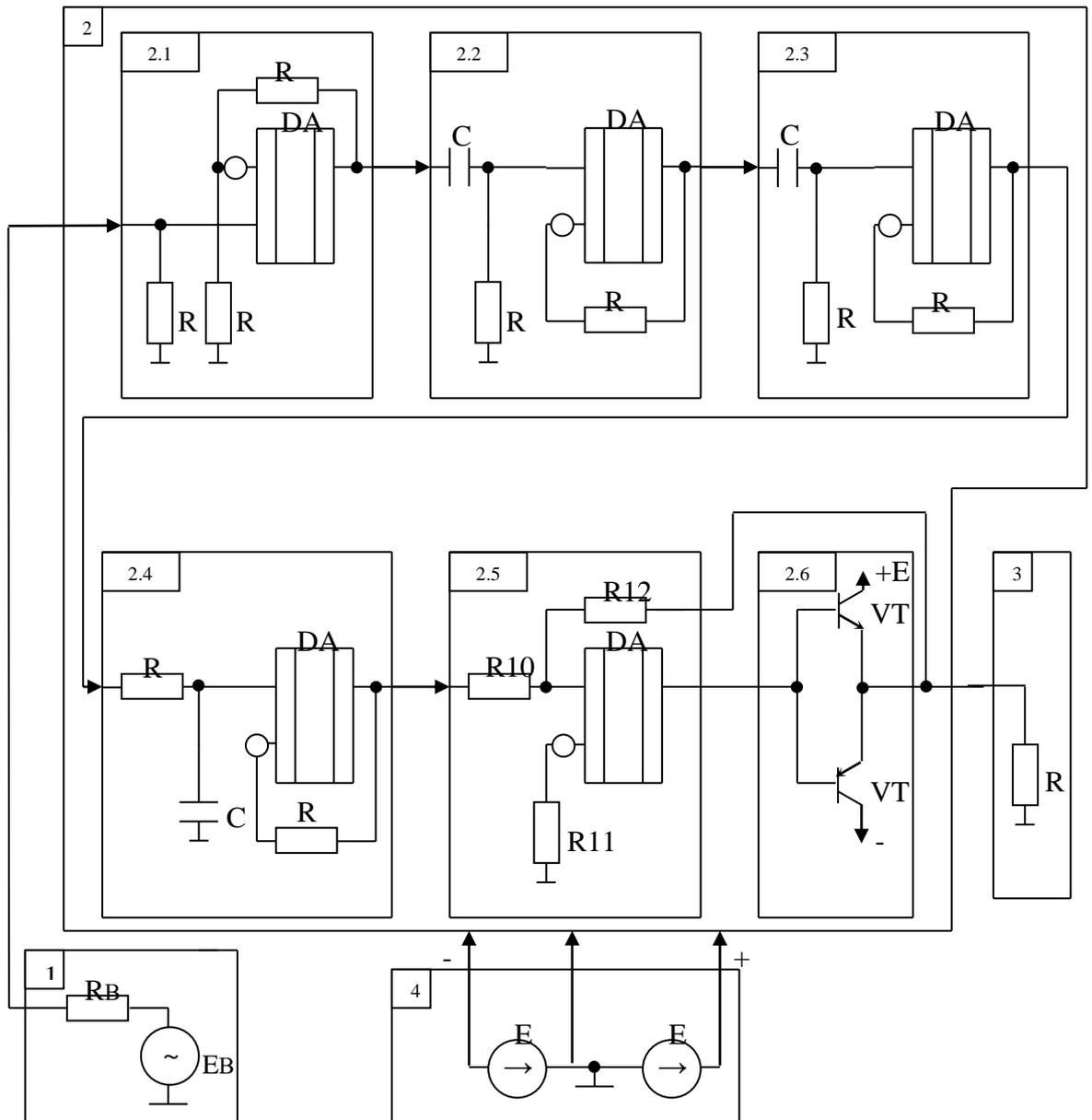


Рис. 3.2. Схема электрическая функциональная УНЧ

1 – источник сигнала; 2 – усилитель; 2.1 – входной каскад на базе неинвертирующего включения ОУ; 2.2 - активный фильтр верхних частот первого порядка на основе дифференцирующей цепочки, включенной на входе ОУ; 2.3 - активный фильтр верхних частот первого порядка на основе дифференцирующей цепочки включенной на входе ОУ; 2.4 - активный фильтр нижних частот первого порядка на основе интегрирующей RC-цепочки включенной на входе; 2.5 - предварительный каскад усилителя мощности с использованием инвертирующего включения ОУ; 2.6 - окончательный каскад усилителя мощности на биполярных транзисторах; 3 - нагрузка; 4 - источник питания

## 4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ. ПРИМЕРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ФРАГМЕНТОВ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

### 4.1. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ 1 - 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ (РЕЖИМ РАБОТЫ ОКОНЕЧНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ: В)

Исходные данные (вариант 00):

входное сопротивление  $R_{вх} = 10 \text{ кОм}$ ;

коэффициент усиления по напряжению  $K_{воос} = 10$ ;

сопротивление нагрузки  $R_{н} = 50 \text{ Ом}$ ;

мощность в нагрузке  $P_{н} = 350 \text{ мВт}$ ;

нижняя граничная частота  $f_{н} = 300 \text{ Гц}$ ;

верхняя граничная частота  $f_{в} = 3 \text{ кГц}$ ;

режим работы окончных транзисторов: В.

#### 4.1.1. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОКОНЕЧНОГО КАСКАДА

1. Схема электрическая принципиальная двухтактного окончного каскада усилителя мощности (УМ) представлена на рис. 4.1.1.

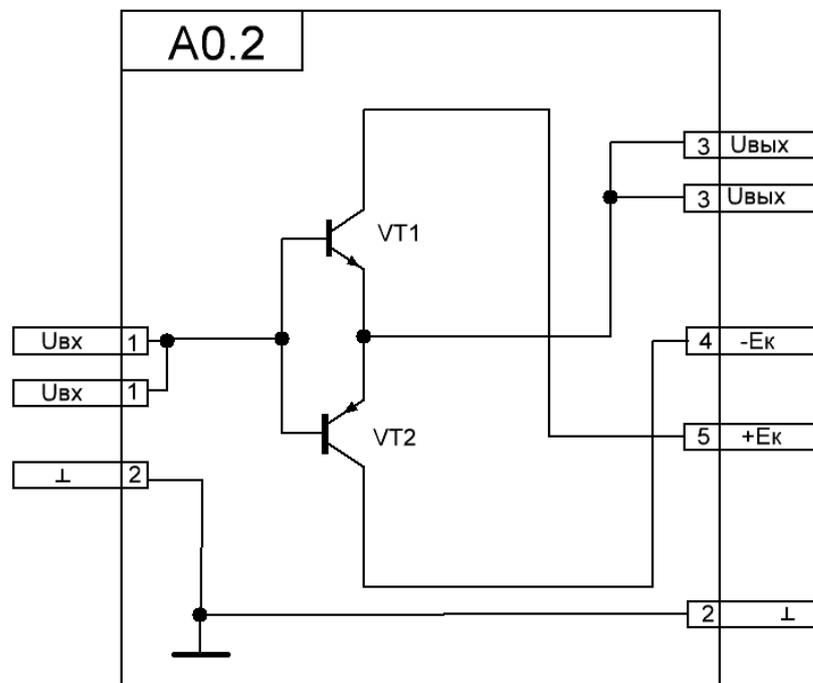


Рис. 4.1.1. Схема электрическая принципиальная окончного каскада УМ при работе транзисторов в режиме В

2. Определяем величину амплитуд тока и напряжения в нагрузке:

$$I_m = \sqrt{\frac{2P_H}{R_H}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,35}{50}} \cong 0,118 \text{ А};$$

$$U_m = \sqrt{2P_H \cdot R_H} = \sqrt{2 \cdot 0,35 \cdot 50} \cong 5,92 \text{ В}.$$

3. Находим величину напряжения источника питания при двухполярном питании выходного каскада:

$$E' = 1,25U_m = 1,25 \cdot 5,95 = 7,4 \text{ В}.$$

Выбираем ближайшее стандартное значение  $E = 9 \text{ В}$ .

4. Определяем максимальное значение мощности, рассеиваемой коллектором транзистора выходного каскада при его работе в режиме В:

$$P_{к \text{ макс}} = \frac{E^2}{\pi^2 |z_H| \cos \varphi} = \frac{9^2}{3,14^2 \cdot 50 \cdot \cos 0^0} = 0,165 \text{ Вт},$$

где  $|z_H|$  – модуль сопротивления нагрузки;  $\varphi$  – угол сдвига фаз между током и напряжением в нагрузке (для чисто активной нагрузки  $\varphi = 0^0$ ).

5. Определяем требования, предъявляемые к транзисторам выходного каскада по току, напряжению, рассеиваемой мощности и частотным свойствам:

$$I_{к \text{ доп}} \geq 1,25I_m = 1,25 \cdot 0,118 = 0,15 \text{ А},$$

$$U_{кэ \text{ доп}} \geq 2,15E = 2,15 \cdot 9 = 19,35 \text{ В},$$

$$P_{к \text{ доп}} \geq 1,2 P_{к \text{ макс}} = 1,2 \cdot 0,165 = 0,198 \text{ Вт},$$

$$f_1/h_{21Э} > f_b = 3 \cdot 10^3 \text{ Гц},$$

где  $f_1$  – частота единичного коэффициента усиления по току транзисторов оконечного каскада,  $h_{21Э}$  – статический коэффициент передачи транзистора по току.

Из паспортных данных (прил. 2, табл. П2.1) выбираем комплементарную пару транзисторов КТ503Б и КТ502Б: КТ503Б – тип n-p-n,  $P_{к \text{ доп}} = 350 \text{ мВт}$ ,  $U_{кэ \text{ доп}} = 40 \text{ В}$ ,  $I_{к \text{ доп}} = 150 \text{ mA}$ ,  $h_{21Э} = 80 \dots 240$ ,  $f_1 = 5 \text{ МГц}$ ; КТ502Б – тип p-n-p,  $P_{к \text{ доп}} = 350 \text{ мВт}$ ,  $U_{кэ \text{ доп}} = 40 \text{ В}$ ,  $I_{к \text{ доп}} = 150 \text{ mA}$ ,  $h_{21Э} = 80 \dots 240$ ,  $f_1 = 5 \text{ МГц}$ .

6. Для проверки полученных значений параметров выходного каскада производим построение нагрузочной прямой и кусочно-линейной аппроксимации выходных вольт-амперных характеристик (ВАХ) транзистора КТ503Б. Из паспортных данных (прил. 2, табл. П2.1) находим напряжение насыщения  $U_{кэ\text{ нас}} = 0,2$  В (типовое) при  $I_{к\text{ нас}} = 10$  мА и  $I_{б\text{ нас}} = 1$  мА.

Определяем крутизну линии критического режима:

$$S_{кр} = \frac{I_{к\text{ нас}}}{U_{кэ\text{ нас}}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{0,2} = 0,05 \text{ А/В}.$$

Определяем величину амплитуды тока базы, соответствующую максимальному значению амплитуды тока нагрузки:

$$I_{бм} \approx \frac{I_m}{h_{21э\text{ мин}}} = \frac{0,118}{80} = 1,48 \cdot 10^{-3} \text{ А}.$$

Определяем значение тока коллектора для построения нагрузочной прямой:

$$I_{кн} = \frac{E}{R_n} = \frac{9}{50} = 0,18 \text{ А}.$$

Находим координаты точки для построения линии критического режима. Для этого полагаем  $I_{к\text{ нас}}^* = 0,2$  А, тогда:

$$U_{кэ\text{ нас}}^* = I_{к\text{ нас}}^* / S_{кр} = 0,2 / 0,05 = 4 \text{ В}.$$

По найденным точкам производим построение линий критического режима и нагрузочной прямой. Результаты построения показаны на рис. 4.1.2.

По рис. 4.1.2. определяем максимальное значение тока коллектора  $I_{к\text{ макс}} = 0,128$  А и минимальное значение напряжения  $U_{кэ\text{ мин}} = 2,6$  В.

Определяем максимальное значение тока базы:

$$I_{б\text{ макс}} = I_{к\text{ макс}} / h_{21э\text{ мин}} = 0,128 / 80 = 0,0016 \text{ А} = 1,6 \text{ мА};$$

7. Учитывая, что  $I_{к} = I_{s0} (e^{\frac{U_{бэ}}{\varphi_T}} - 1)$ , где  $I_{s0}$  – обратный ток коллектора (для КТ503 -  $I_{s0} \leq 1$  мкА),  $\varphi_T$  – термический потенциал (для нормальных условий  $\varphi_T = 26$  мВ), получим, что для  $I_{к\text{ макс}} = 0,128$  А значение  $U_{бэ\text{ макс}} = 0,305$  В.

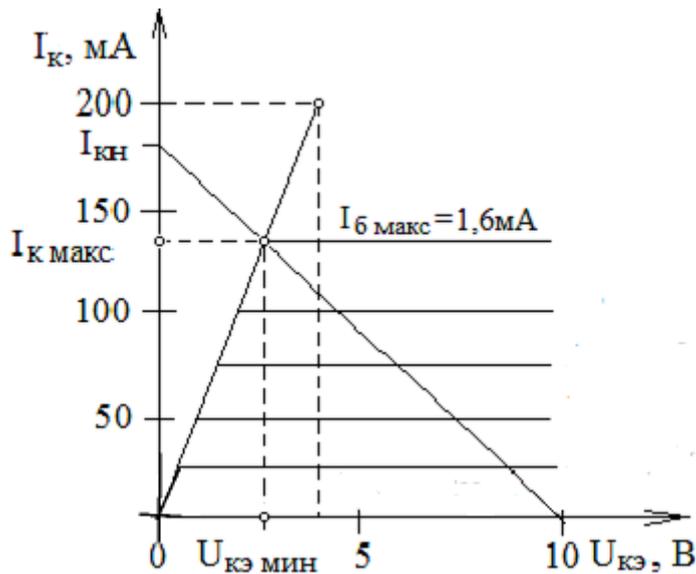


Рис. 4.1.2. Нагрузочная прямая и линейно-кусочная аппроксимация выходной ВАХ транзистора КТ503Б

8. На основе полученных данных определяем амплитуду напряжения на входе оконечного каскада:

$$U_{\text{вх.ок}} = U_m + U_{\text{бэ макс}} = 5,92 + 0,305 = 6,225 \text{ В},$$

и максимальную мощность, отдаваемую в нагрузку:

$$P_{\text{н макс}} = \frac{(E - U_{\text{кэ мин}}) I_{\text{к макс}}}{2} = \frac{(9 - 2,6) \cdot 0,128}{2} = 0,41 \text{ Вт}.$$

Проверяем выполнение условий:

$$I_{\text{к макс}} < I_{\text{к макс доп}}; \quad 0,128 \text{ А} < 0,150 \text{ А};$$

$$P_{\text{н}} \leq P_{\text{н макс}}; \quad 0,35 \text{ Вт} \leq 0,4 \text{ Вт}.$$

Таким образом, выбранный режим работы выходного каскада обеспечивает заданное значение мощности в нагрузке. Максимальное значение тока коллектора транзистора не превышает допустимого значения, т.е. транзисторы и режим их работы выбраны верно.

9. Определяем входное сопротивление оконечного каскада:

$$R_{\text{вх ок в}} \approx R_{\text{н}}(h_{21\text{э мин}} + 1) = 50(80 + 1) = 4\,050 \text{ Ом}.$$

Исходя из полученного значения  $R_{\text{вх}}$ , в предварительном усилителе

можно использовать операционные усилители с допустимой величиной сопротивления нагрузки  $R_{н\ min} \leq 4,05\ \text{кОм}$ .

## 4.1.2. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 2. РАСЧЕТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО КАСКАДА УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

1. Определяем требования к частоте единичного усиления ОУ ( $f_{1\text{ОУ}}$ ) и к максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ  $V_{\text{макс}}$ :

$$f_{1\text{ОУ}} = 5 \cdot K_{\text{УОС}} \cdot f_{\text{В}} = 5 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 10^3 = 0,15 \cdot 10^6\ \text{Гц};$$

$$V_{\text{макс}} \geq 2\pi f_{\text{В}} \cdot U_{\text{м}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot 5,92 = 0,11 \cdot 10^6\ \text{В/с} = 0,11\ \text{В/мкс.}$$

2. С учетом полученных требований к ОУ на основе паспортных данных (прил. 2, табл. П2.2) выбираем ОУ К1407УД1 со следующими параметрами:

$$U_{\text{пит}} = \pm (1,2 \dots 13,2)\text{В};$$

$$K_{\text{u}} = 10 \cdot 10^3;$$

$$I_{\text{вх}} = 10 \cdot 10^{-6}\ \text{А};$$

$$f_1 = 20 \cdot 10^6\ \text{Гц};$$

$$V_{\text{u вых}} = 10\ \text{В/мкс};$$

$$R_{\text{вх}} \geq 200 \cdot 10^3\ \text{Ом};$$

$$R_{\text{н мин}} = 1 \cdot 10^3\ \text{Ом}.$$

В соответствии с паспортными данными на ОУ типа К1407УД1 для обеспечения устойчивой работы емкость конденсатора С2 цепи частотной коррекции должна быть равна 4,7 пФ.

Схема электрическая принципиальная предварительного каскада усилителя мощности представлена на рис. 4.1.3.

3. Определяем номиналы элементов схемы:

3.1. Так как входное сопротивление  $R_{\text{вх}}$  определяется величиной сопротивления резистора R1, находим значение сопротивления резистора R1 из соотношения:

$$R_{\text{вх}} \leq R1 \ll R_{\text{вх ОУ}};$$

$$10^4\ \text{Ом} \leq R1 \ll 10^5\ \text{Ом};$$

Из стандартного 10% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. П3.1) и типов подстроечных резисторов (прил. 4, табл. П4.2) выбираем резистор R1-СП5-16ВА-0,5-10 кОм;

3.2. Определяем значение емкости разделительного конденсатора С1 из соотношения:

$$C1 \geq 50 / (2\pi f_{\text{н}} \cdot R1) = 50 / (2 \cdot 3,14 \cdot 300 \cdot 10^4) \approx 2,65 \cdot 10^{-6}\ \text{Ф};$$

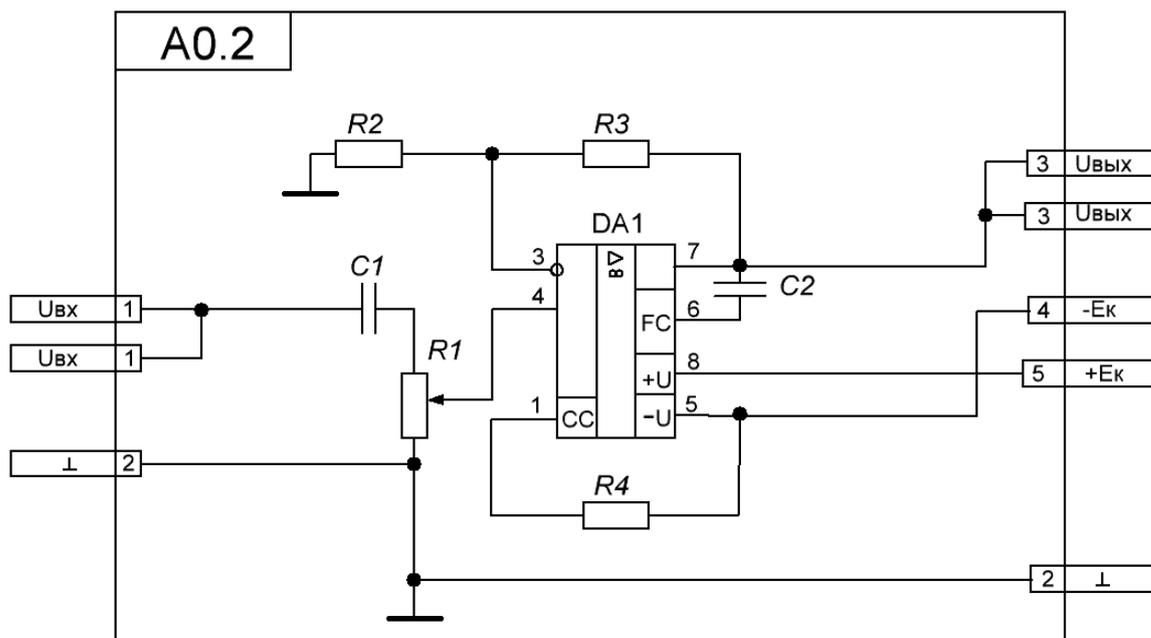


Рис. 4.1.3. Схема электрическая принципиальная предварительного каскада усилителя мощности

3.3. Исходя из заданного значения коэффициента усиления  $K_{\text{уос}}$  и условия балансировки ОУ, определяем величины сопротивлений резисторов цепи обратной связи  $R2$  и  $R3$ :

$$R2 = R1 = 10 \text{ кОм},$$

$$R3 = R2(K_{\text{уос}} - 1) = 10 \cdot 10^3(10 - 1) = 90 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем резистор  $R3 = 100 \text{ кОм}$ , резистор  $R2 = 11 \text{ кОм}$ .

Проверяем выполнение условия

$$(R2 + R3)R_{\text{вх ок В}} / (R2 + R3 + R_{\text{вх ок В}}) > R_{\text{н min}};$$

$$(10 + 90) \cdot 4,05 / (10 + 90 + 4,05) \text{ кОм} > 1 \text{ кОм};$$

3.4. Задаем величину тока управления ОУ  $I_{\text{упр}} = 10^{-3} \text{ А}$  и определяем сопротивление резистора регулировки тока  $R4$  в соответствии с паспортными данными на ОУ К1407УД1:

$$R4 = (2U_{\text{пит}} - 0,7) / I_{\text{упр}} = (2 \cdot 9 - 0,7) / 10^{-3} = 17,3 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем резистор  $R4 = 18 \text{ кОм}$ ;

3.5. Определяем максимальные значения мощностей рассеивания

резисторов R1, R2 и R3:

$$P_{R1} = E^2/(R1) = 9^2/(10 \cdot 10^3) = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R2} = E^2/(R2) = 9^2/(10 \cdot 10^3) = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R3} = E^2/(R3) = 9^2/(90 \cdot 10^3) = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}.$$

4. Выбираем типы резисторов и конденсаторов, входящих в состав схемы (прил. 3 - 5):

R1 - СП5-16ВА-0, 5-10 кОм ±10%;

R2 - С2-1-0,125-10 кОм ±5%;

R3 - С2-1-0,125-90 кОм ±5%;

R4 - С2-1-0,125-18 кОм ±5%;

C1 – К76П-1-63В-3,3 мкФ ±10%;

C2 - К10-17Б-М47-4,7 пФ ±5%.

5. Схема электрическая принципиальная усилителя мощности в упрощенном виде показана на рис. 4.1.4. Для уменьшения нелинейных искажений усилитель охвачен общей цепью отрицательной обратной связи, для чего резистор R3 соединен с выходом оконечного каскада УМ.

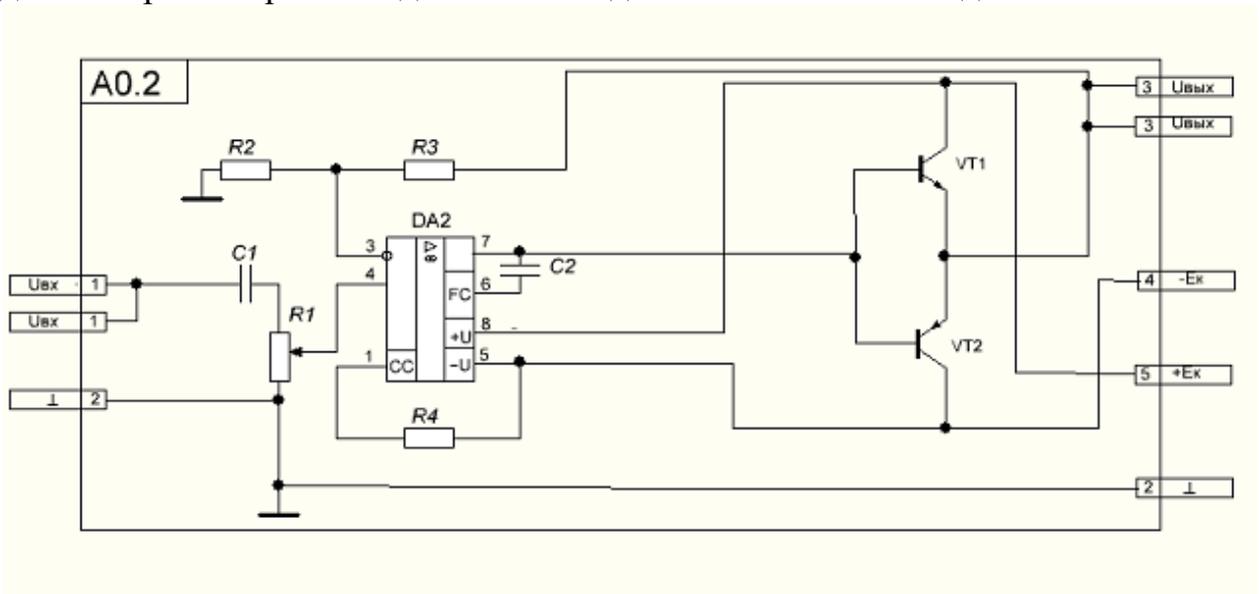


Рис. 4.1.4. Схема электрическая принципиальная усилителя мощности

Перечень элементов схемы электрической принципиальной усилителя мощности:

R1 - СП5-16ВА-0,5-10 кОм ±10%;

R2 - С2-1-0,125-11 кОм ±5%;

R3 - С2-1-0,125-100 кОм ±5%;

R4 - С2-1-0,125-18 кОм ±5%;

C1 – К76П-1-63В-3,3 мкФ ±10%;

C2 - К10-17Б-М47-4,7 пФ ±5%.

## 4.2. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ 3 - 4.

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ (РЕЖИМ РАБОТЫ ОКОНЕЧНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ: А-В)

Исходные данные (вариант 00):

входное сопротивление  $R_{вх} = 10$  кОм;

коэффициент усиления по напряжению  $K_{воп} = 10$ ;

сопротивление нагрузки  $R_{н} = 50$  Ом;

мощность в нагрузке  $P_{н} = 350$  мВт;

нижняя граничная частота  $f_{н} = 0$  Гц;

верхняя граничная частота  $f_{в} = 3$  кГц;

режим работы оконечных транзисторов: А-В.

#### 4.2.1. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 3.

##### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОКОНЕЧНОГО КАСКАДА

1. Схема электрическая принципиальная двухтактного оконечного каскада усилителя мощности (УМ) представлена на рис. 4.2.1.

2. Определяем величину амплитуд тока и напряжения в нагрузке:

$$I_m = \sqrt{\frac{2P_{н}}{R_{н}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,35}{50}} \cong 0,118 \text{ А};$$

$$U_m = \sqrt{2P_{н} \cdot R_{н}} = \sqrt{2 \cdot 0,35 \cdot 50} \cong 5,92 \text{ В}.$$

3. Находим величину напряжения источника питания при двухполярном питании выходного каскада:

$$E' = 1,25U_m = 1,25 \cdot 5,95 = 7,4 \text{ В}.$$

Выбираем ближайшее стандартное значение  $E = 9$  В.

4. Определяем максимальное значение мощности, рассеиваемой коллектором транзистора выходного каскада при его работе в режиме А-В:

$$P_{к \text{ макс}} = I_{к0} \cdot E + \frac{E^2}{\pi^2 |Z_{н}| \cos \varphi},$$

где  $I_{к0} = 0,1I_m$  – выбранное значение тока покоя транзисторов выходного каскада,  $|Z_{н}|$  – модуль сопротивления нагрузки,  $\varphi$  – угол сдвига фаз между током и напряжением в нагрузке (для чисто активной нагрузки  $\varphi = 0^\circ$ ).

$$P_{к \text{ макс}} = 0,118 \cdot 0,1 \cdot 9 + \frac{9^2}{(3,14^2 \cdot 50 \cdot \cos 0^\circ)} = 0,272 \text{ Вт}.$$

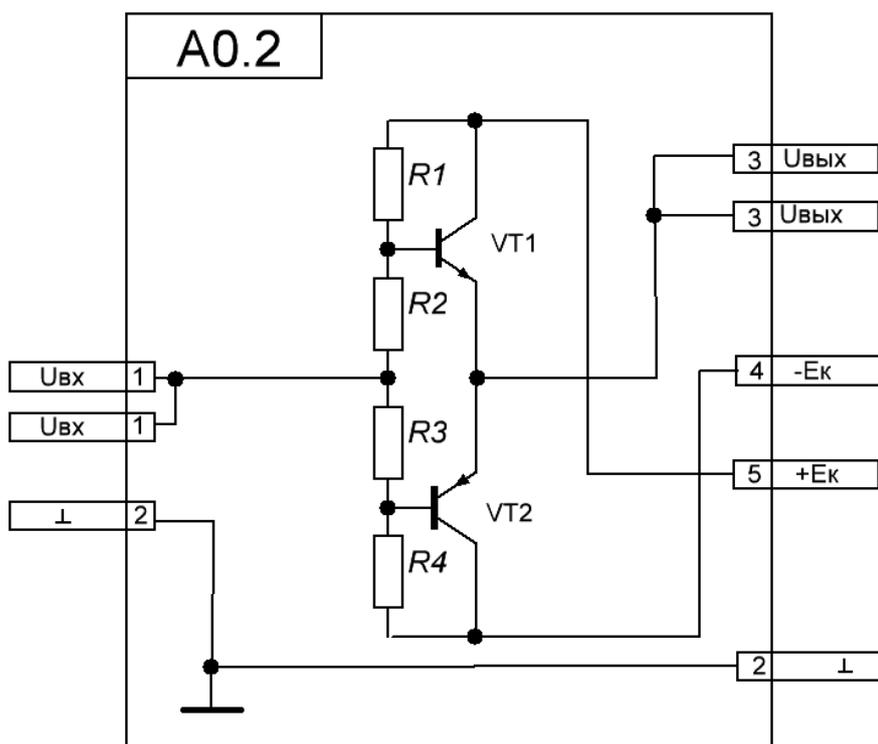


Рис. 4.2.1. Схема электрическая принципиальная оконечного каскада УМ при работе транзисторов в режиме А-В

5. Определяем требования, предъявляемые к транзисторам выходного каскада по току, напряжению, рассеиваемой мощности и частотным свойствам:

$$I_{к \text{ доп}} \geq 1,25I_m = 1,25 \cdot 0,118 = 0,15 \text{ А,}$$

$$U_{кэ \text{ доп}} \geq 2,15E = 2,15 \cdot 9 = 19,35 \text{ В,}$$

$$P_{к \text{ доп}} \geq 1,2 P_{к \text{ макс}} = 1,2 \cdot 0,272 = 0,326 \text{ Вт,}$$

$$f_1/h_{21э} > f_b = 3 \cdot 10^3 \text{ Гц,}$$

где  $f_1$  - частота единичного коэффициента усиления по току транзисторов оконечного каскада,  $h_{21э}$  - статический коэффициент передачи транзистора по току.

Из паспортных данных (прил. 2, табл. П2.1) выбираем комплементарную пару транзисторов КТ503Б и КТ502Б: КТ503Б – тип n-p-n,  $P_{к \text{ доп}} = 350 \text{ мВт}$ ,  $U_{кэ \text{ доп}} = 40 \text{ В}$ ,  $I_{к \text{ доп}} = 150 \text{ мА}$ ,  $h_{21э} = 80 \dots 240$ ,  $f_1 = 5 \text{ МГц}$ ; КТ502Б – тип p-n-p,  $P_{к \text{ доп}} = 350 \text{ мВт}$ ,  $U_{кэ \text{ доп}} = 40 \text{ В}$ ,  $I_{к \text{ доп}} = 150 \text{ мА}$ ,  $h_{21э} = 80 - 240$ ,  $f_1 = 5 \text{ МГц}$ .

6. Для проверки полученных значений параметров выходного каскада производим построение нагрузочной прямой и кусочно-линейной

аппроксимации выходных ВАХ транзистора КТ503Б. Из паспортных данных (прил. 2, табл. П2.1) находим напряжение насыщения  $U_{кэ\text{ нас}} = 0,2 \text{ В}$  (типовое) при  $I_{кнас} = 10 \text{ мА}$  и  $I_{бнас} = 1 \text{ мА}$ .

Определяем крутизну линии критического режима:

$$S_{кр} = \frac{I_{кнас}}{U_{кэ\text{ нас}}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{0,2} = 0,05 \text{ А/В}.$$

Определяем величину амплитуды тока базы, соответствующую максимальному значению амплитуды тока нагрузки:

$$I_{бм} \approx \frac{I_m}{h_{21э\text{ мин}}} = \frac{0,118}{80} = 1,48 \cdot 10^{-3} \text{ А}.$$

Определяем значение тока коллектора для построения нагрузочной прямой:

$$I_{кн} = \frac{E}{R_n} = \frac{9}{50} = 0,18 \text{ А}.$$

Находим координаты точки для построения линии критического режима. Для этого полагаем  $I_{к\text{ нас}}^* = 0,2 \text{ А}$ , тогда:

$$U_{кэ\text{ нас}}^* = I_{к\text{ нас}}^* / S_{кр} = 0,2 / 0,05 = 4 \text{ В}.$$

По найденным точкам производим построение линий критического режима и нагрузочной прямой. Результаты построения показаны на рис. 4.2.2.

По рис.4.2.2. определяем максимальное значение тока коллектора  $I_{к\text{ макс}} = 0,128 \text{ А}$  и минимальное значение напряжения  $U_{кэ\text{ мин}} = 2,6 \text{ В}$ .

Определяем максимальное значение тока базы:

$$I_{б\text{ макс}} = I_{к\text{ макс}} / h_{21э\text{ мин}} = 0,128 / 80 = 0,0016 \text{ А} = 1,6 \text{ мА}.$$

## 7. Построение входной и проходной ВАХ

Учитывая, что  $I_K = I_{s0} (e^{\frac{U_{бэ}}{\varphi_T}} - 1)$ , где  $I_{s0}$  – обратный ток коллектора (для КТ503 -  $I_{s0} \leq 1 \text{ мкА}$ ),  $\varphi_T$  – термический потенциал (для нормальных условий  $\varphi_T = 26 \text{ мВ}$ ), получим, что для  $I_{к\text{ макс}} = 0,128 \text{ А}$  значение  $U_{бэ\text{ макс}} = 0,305 \text{ В}$ .

Находим значение тока  $I_{к0}$ , соответствующее точке покоя:

$$I_{к\text{ макс}}/15 \leq I_{к0} \leq 0,95(I_{к\text{ макс}} - I_m);$$

$$0,128/15 \leq I_{к0} \leq 0,95(0,128 - 0,118);$$

$$0,0085 \leq I_{к0} \leq 0,0095.$$

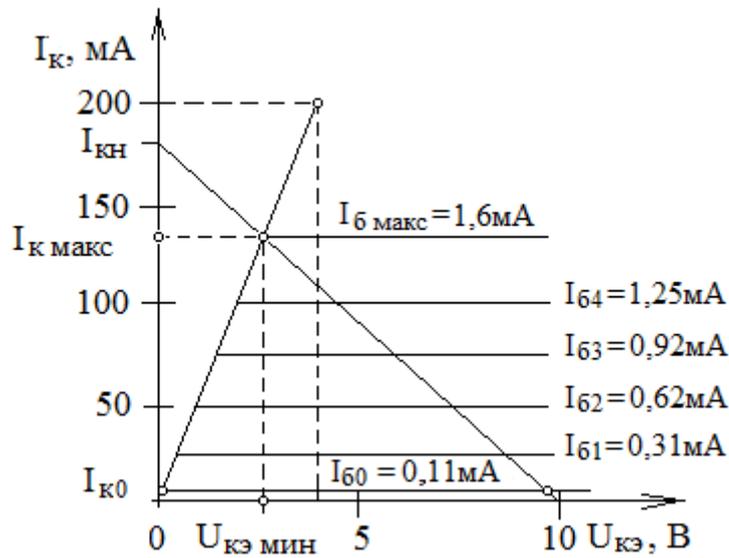


Рис. 4.2.2. Нагрузочная прямая и линейно-кусочная аппроксимация выходной ВАХ транзистора КТ503Б

Выбираем  $I_{к0} = 0,009$  А и вычисляем соответствующее ему значение  $U_{бэ0} = 0,237$  В.

Находим приращение напряжения на базе  $\Delta U_{бэ\text{ макс}}$ , соответствующее максимальному значению тока базы:

$$\Delta U_{бэ\text{ макс}} = U_{бэ\text{ макс}} - U_{бэ0} = 0,305 - 0,237 = 0,068 \text{ В.}$$

Находим значение тока  $I_{б0}$ , соответствующее точке покоя:

$$I_{б0} = I_{к0} / h_{21э\text{ мин}} = 9/80 = 0,11 \text{ мА.}$$

Линейно-кусочная аппроксимация входной и проходной ВАХ для транзистора КТ503Б, построенная по найденным значениям характерных точек, представлена на рис. 4.2.3.

8. На основе полученных данных определяем амплитуду напряжения на входе оконечного каскада:

$$U_{\text{вх.ок}} = U_{\text{м}} + \Delta U_{бэ\text{ макс}} = 5,92 + 0,068 = 5,988 \text{ В}$$

и максимальную мощность, отдаваемую в нагрузку:

$$P_{\text{н макс}} = \frac{(E - U_{кэ\text{ мин}}) I_{к\text{ макс}}}{2} = \frac{(9 - 2,6) \cdot 0,128}{2} = 0,41 \text{ Вт.}$$

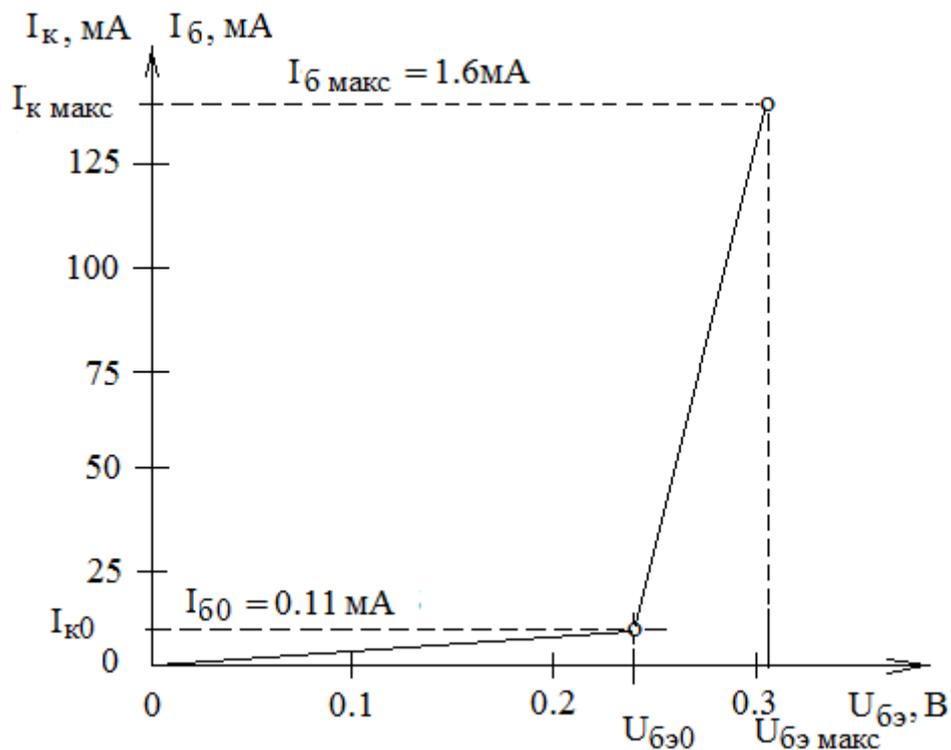


Рис. 4.2.3. Линейно-кусочная аппроксимация входной и проходной ВАХ транзистора КТ503Б

Проверяем выполнение условий:

$$I_{к \text{ макс}} < I_{к \text{ макс доп}}; \quad 0,128 \text{ A} < 0,150 \text{ A};$$

$$P_{н} \leq P_{н \text{ макс}}; \quad 0,35 \text{ Вт} \leq 0,4 \text{ Вт}.$$

Таким образом, выбранный режим работы выходного каскада обеспечивает заданное значение мощности в нагрузке. Максимальное значение тока коллектора транзистора не превышает допустимого значения, т.е. транзисторы и режим их работы выбраны верно.

9. Находим номиналы резисторов делителя напряжения:

$$R1 = R4 = (E - U_{бэ0})/10I_{б0} = (9 - 0,237)/(10 \cdot 0,11 \cdot 10^{-3}) = 7,9 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$R2 = R3 = U_{бэ0}/9I_{б0} = 0,237/(9 \cdot 0,11 \cdot 10^{-3}) = 239 \text{ Ом}.$$

10. Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем резисторы  $R1 = R4 = 8,2 \text{ кОм}$ ,  $R2 = R3 = 240 \text{ Ом}$ .

11. Определяем максимальные значения мощностей рассеивания резисторов  $R1, R2, R3$  и  $R4$ :

$$P_{R1} = P_{R4} = (E - U_{бэ0}) \cdot 10I_{б0} = (9 - 0,237) \cdot 10 \cdot 0,11 \cdot 10^{-3} = 9,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R2} = U_{60} \cdot 9I_{60} = 0,237 \cdot 9 \cdot 0,11 \cdot 10^{-3} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

12. Выбираем типы и мощность резисторов (прил. 3, табл. П3.3), входящих в состав схемы:

R1 - C2-1-0,125-8,2 кОм±5%;

R2 - C2-1-0,125-240 кОм±5%;

R3 - C2-1-0,125-240 кОм±5%;

R4 - C2-1-0,125-8,2 кОм±5%.

13. Определяем сопротивление делителя R1 - R4, приведенное ко входу окончного каскада:

$$R_d \approx R1 \cdot R4 / (R1 + R4) = 8,2 \cdot 10^3 \cdot 8,2 \cdot 10^3 / (8,2 \cdot 10^3 + 8,2 \cdot 10^3) = 4,1 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

14. Определяем входное сопротивление окончного каскада:

1) в режиме В

$$R_{\text{вх ок В}} \approx R_n(h_{21э \text{ мин}} + 1) = 50(80 + 1) = 4050 \text{ Ом;}$$

2) в режиме А-В

$$\begin{aligned} R_{\text{вх ок АВ}} &\approx R_{\text{вх ок В}} \cdot R_d / (R_{\text{вх ок В}} + R_d) = \\ &= 4,05 \cdot 10^3 \cdot 4,1 \cdot 10^3 / (4,05 \cdot 10^3 + 4,1 \cdot 10^3) = 2,04 \cdot 10^3 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

15. Исходя из полученного значения  $R_{\text{вх}}$ , в предварительном усилителе можно использовать операционные усилители с допустимой величиной сопротивления нагрузки  $R_{n \text{ мин}} \leq 2,04 \text{ кОм}$ .

#### 4.2.2. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО КАСКАДА УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

1. Определяем требования к частоте единичного усиления ОУ ( $f_{10у}$ ) и к максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ  $V_{\text{макс}}$ :

$$f_{10у} = 5 \cdot K_{Uoc} \cdot f_B = 5 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 10^3 = 0,15 \cdot 10^6 \text{ Гц;}$$

$$V_{\text{макс}} \geq 2\pi f_B \cdot U_m = 2 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot 5,92 = 0,11 \cdot 10^6 \text{ В/с} = 0,11 \text{ В/мкс.}$$

2. С учетом полученных требований к ОУ на основе паспортных данных (прил. 6.2, табл. 6.2.2) выбираем ОУ К1407УД1 со следующими параметрами:

$$U_{\text{пит}} = \pm (1,2 - 13,2) \text{ В;}$$

$$K_u = 10 \cdot 10^3;$$

$$I_{\text{вх}} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ А;}$$

$$f_1 = 20 \cdot 10^6 \text{ Гц};$$

$$V_{u \text{ Вых}} = 10 \text{ В/мкс};$$

$$R_{\text{ВХ}} \geq 200 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{Н МИН}} = 1 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

В соответствии с паспортными данными на ОУ типа К1407УД1 для обеспечения устойчивой работы емкость конденсатора С2 цепи частотной коррекции должна быть равна 4,7 пФ.

Схема электрическая принципиальная предварительного каскада усилителя мощности представлена на рис.4.2.4.

3. Определяем номиналы элементов схемы:

3.1. Так как входное сопротивление  $R_{\text{ВХ}}$  определяется величиной сопротивления резистора R1, находим значение сопротивления резистора R1 из соотношения:

$$R_{\text{ВХ}} \leq R1 \ll R_{\text{ВХ ОУ}},$$

$$10^4 \text{ Ом} \leq R1 \ll 10^5 \text{ Ом};$$

Из стандартного 10% ряда номиналов резисторов (прил. 6.3, табл. 6.3.1) и типов подстроечных резисторов (прил. 4, табл. П4.2) выбираем резистор R1-СП5-16ВА-0,5-10 кОм;

3.2. Исходя из заданного значения коэффициента усиления  $K_{\text{уос}}$  и условия балансировки ОУ, определяем величины сопротивлений резисторов цепи обратной связи R2 и R3:

$$R2 = R1 = 10 \text{ кОм};$$

$$R3 = R2(K_{\text{уос}} - 1) = 10 \cdot 10^3 \cdot (10 - 1) = 90 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

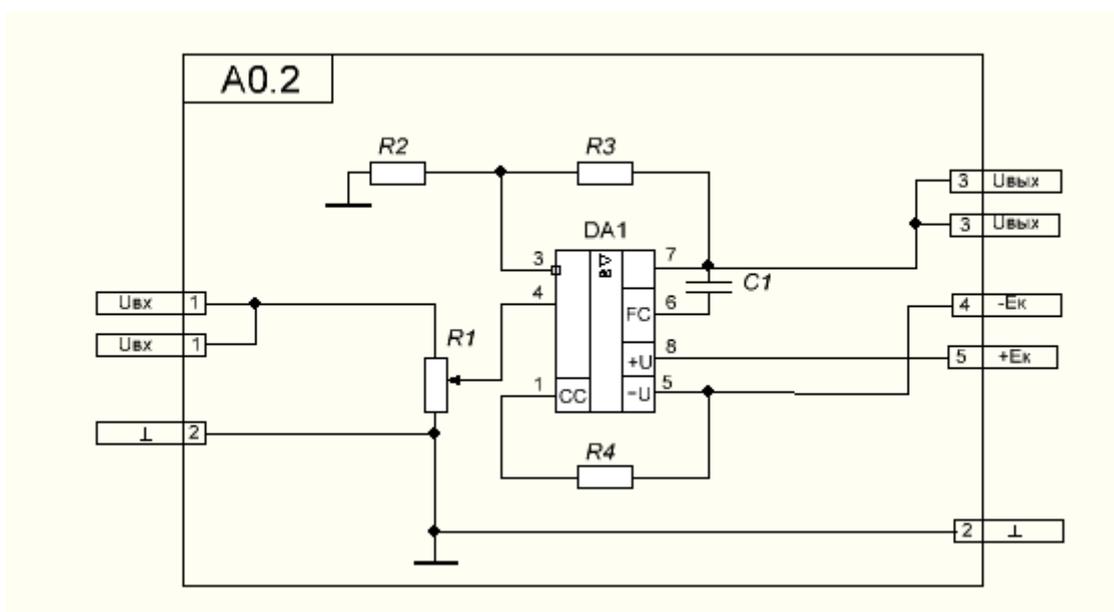


Рис. 4.2.4. Схема электрическая принципиальная предварительного каскада усилителя мощности

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем резистор  $R_3 = 100$  кОм, резистор  $R_2 = 11$  кОм.

Проверяем выполнение условия для режима А-В:

$$(R_2 + R_3)R_{\text{вх ок АВ}}/(R_2 + R_3 + R_{\text{вх ок АВ}}) > R_{\text{н min}};$$

$$(11 + 100) \cdot 2,04 / (11 + 100 + 2,04) \text{ кОм} > 2 \text{ кОм};$$

3.3. Задаем величину тока управления ОУ  $I_{\text{упр}} = 10^{-3}$  А и определяем сопротивление резистора регулировки тока  $R_4$  в соответствии с паспортными данными на ОУ К1407УД1:

$$R_4 = (2U_{\text{пит}} - 0,7) / I_{\text{упр}} = (2 \cdot 9 - 0,7) / 10^{-3} = 17,3 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем резистор  $R_4 = 18$  кОм;

3.4. Определяем максимальные значения мощностей рассеивания резисторов  $R_1, R_2$  и  $R_3$ :

$$P_{R_1} = E^2/(R_1) = 9^2/(10 \cdot 10^3) = 8,1 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R_2} = E^2/(R_2) = 9^2/(10 \cdot 10^3) = 8,1 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R_3} = E^2/(R_3) = 9^2/(91 \cdot 10^3) = 8,9 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}.$$

4. Выбираем типы резисторов и конденсаторов, входящих в состав схемы (прил. 3 – 5):

$R_1$  - СП5-16ВА-0,5-10 кОм  $\pm 10\%$ ;

$R_2$  - С2-1-0,125-10 кОм  $\pm 5\%$ ;

$R_3$  - С2-1-0,125-91 кОм  $\pm 5\%$ ;

$R_4$  - С2-1-0,125-18 кОм  $\pm 5\%$ ;

$C_1$  - К10-17Б-М47-4,7 пФ  $\pm 5\%$ .

5. Схема электрическая принципиальная усилителя мощности в упрощенном виде показана на рис. 4.2.5. Для уменьшения нелинейных искажений усилитель охвачен общей цепью отрицательной обратной связи, для чего резистор  $R_3$  соединен с выходом оконечного каскада УМ.

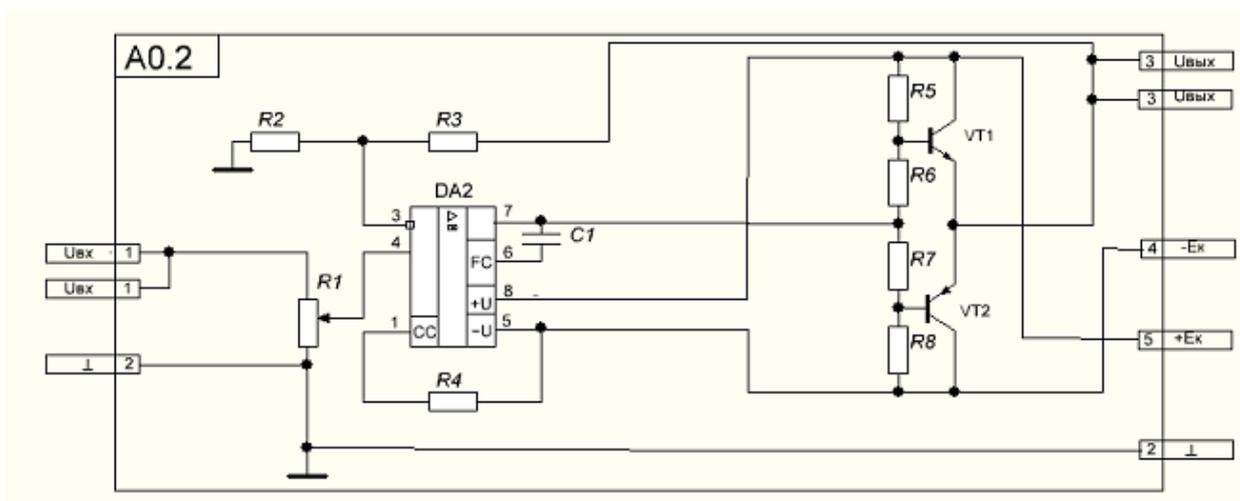


Рис. 4.2.5. Схема электрическая принципиальная усилителя мощности

Перечень элементов схемы электрической принципиальной усилителя мощности:

R1 - СП5-16ВА-0, 5-10 кОм ±10%;

R2 - С2-1-0,125-10 кОм±5%;

R3 - С2-1-0,125-91 кОм±5%;

R4 - С2-1-0,125-18 кОм±5%;

R5 - С2-1-0,125-8, 2 кОм±5%;

R6 - С2-1-0,125-240 кОм±5%;

R7 - С2-1-0,125-240 кОм±5%;

R8 - С2-1-0,125-8, 2 кОм±5%;

C1 - К10-17Б-М47-4,7пФ±5%.

### 4.3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 5.

#### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ ПЕРВОГО ПОРЯДКА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ РС-ЦЕПОЧКИ, ВКЛЮЧЕННОЙ НА ВХОДЕ ОУ

Исходные данные (вариант 00):

верхняя частота среза  $f_{вФНЧ} = 16 \cdot 10^3$  Гц;

входное сопротивление  $R_{вхФНЧ} \geq 10$  кОм;

сопротивление нагрузки ФНЧ  $R_{нФНЧ} \geq 10$  кОм;

максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ФНЧ  $U_m = 10$ В;

коэффициент усиления по напряжению  $K_{уФНЧ} = 10$ .

Электрический расчет

1. Для выбора ОУ определяем требования к значениям параметров ОУ:

1.1. Значение коэффициента усиления по напряжению ФНЧ  $K_{uФНЧ}=10$ , что позволяет обеспечить необходимую полосу частот, усиливаемых операционным усилителем, который используется в ФНЧ в качестве активного элемента;

1.2. Определяем требования к частоте единичного усиления ОУ ( $f_{1ОУ}$ ) из выражения:

$$f_{1ОУ} \geq 5 \cdot K_{uФНЧ} \cdot f_{вФНЧ} = 5 \cdot 10 \cdot 16 \cdot 10^3 = 800 \cdot 10^3 \text{ Гц};$$

1.3. Определяем требования к скоростным характеристикам ОУ. Для этого вычисляем требуемое значение максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ,  $V_{\text{макс}}$  из соотношения:

$$V_{\text{макс}} > 2\pi \cdot f_{вФНЧ} \cdot U_m = 2 \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 10 = 1 \text{ В/мкс},$$

где  $U_m$  – максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ФНЧ;

1.4. С учетом полученных требований к ОУ на основе паспортных данных (прил. 2, табл. П2.2) выбираем ОУ типа К154УД1 со следующими параметрами:

коэффициент усиления напряжения,  $K_u = > 50000$ ;

максимальная амплитуда выходного напряжения  $U_{\text{вых}}, \text{ В} < \pm 11$ ;

потребляемый ток  $I_{\text{пот}}, \text{ мА} \leq 3$ ;

входное сопротивление  $R_{\text{вх}}, \text{ МОм} > 1$ ;

выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}, \text{ Ом} < 30$ ;

частота единичного усиления  $f_{1ОУ}, \text{ МГц} > 1$ ;

скорость нарастания выходного напряжения  $V_{\text{макс}}, \text{ В/мкс} > 10$

номинальные напряжения питания  $U_{\text{пит}}, \text{ В} \pm 15$ ;

минимальное сопротивление нагрузки  $R_{\text{н доп}}, \text{ кОм} > 2$ .

2. Схема электрическая принципиальная разрабатываемого устройства представлена на рис. 4.3.1.

3. Определяем номиналы элементов схемы:

3.1. Определяем величину сопротивления резистора  $R1$  из соотношения:

$$R_{\text{вхФНЧ}} \leq R1 \ll R_{\text{вх ОУ}}$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. П3.1) выбираем резистор  $R1 = 10 \text{ кОм}$ .

3.2. Исходя из заданного значения коэффициента усиления напряжения ФНЧ ( $K_{uФНЧ}=10$ ) и условия балансировки ОУ, определяем значения сопротивлений  $R2$  и  $R3$ :

$$R2 = R1 = 10^4 = 10 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$R3 = R2(K_{uФНЧ} - 1) = 10 \cdot 10^3(10 - 1) = 90 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

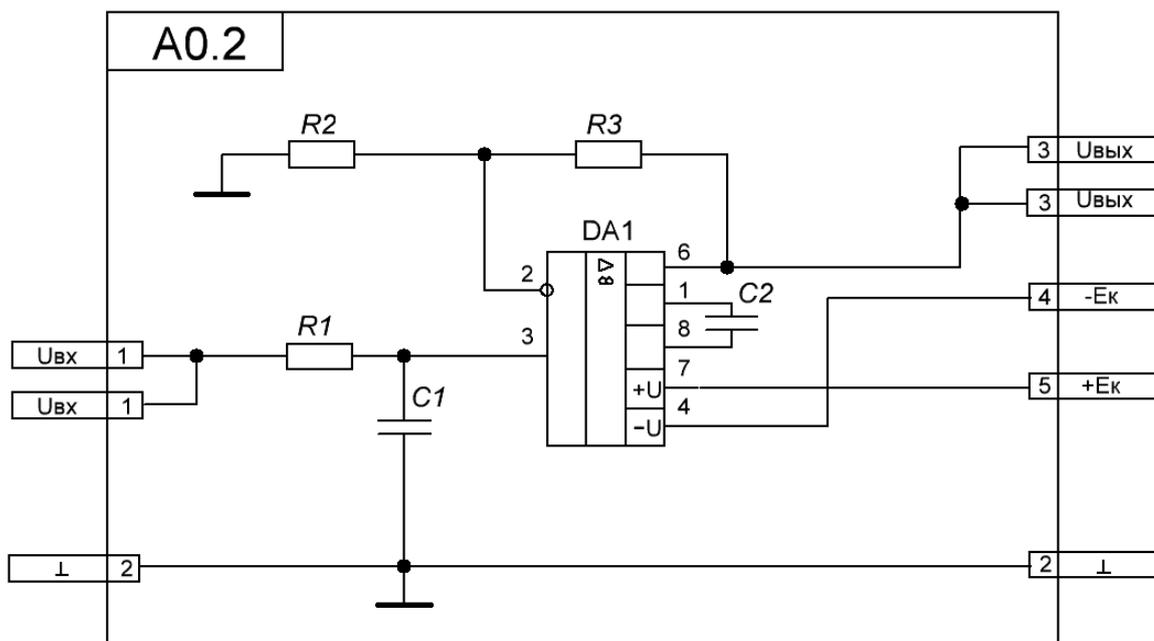


Рис. 4.3.1. Схема электрическая принципиальная активного фильтра нижних частот первого порядка на основе интегрирующей RC-цепочки, включенной на входе ОУ

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем резистор  $R3 = 91 \text{ кОм}$ .

Проверяем выполнение условия:

$$(R3 + R2)R_{\text{нФНЧ}} / (R2 + R3 + R_{\text{нФНЧ}}) \geq R_{\text{н доп}};$$

$$(10 \cdot 10^3 + 91 \cdot 10^3)10 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3 / (10 \cdot 10^3 + 91 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3) = \\ = 9 \cdot 10^3 \geq 2 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

3.3. Исходя из заданного значения частоты среза ФНЧ  $f_{\text{вФНЧ}}$ , определяем значение емкости конденсатора C1 из соотношения:

$$C1 = 1 / (2\pi R1 f_{\text{вФНЧ}}) = 1 / (2 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 16 \cdot 10^3) \approx 995 \cdot 10^{-12} \text{ Ф.}$$

Из стандартного 5% ряда номиналов конденсаторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем конденсатор  $C1 = 1 \text{ нФ}$ .

3.4. В соответствии с паспортными данными на ОУ типа К1407УД1 для обеспечения устойчивой работы емкость конденсатора C2 цепи частотной коррекции должна быть равна 4,7 пФ.

4. Определяем максимальные значения мощностей рассеивания для резисторов R1, R2 и R3:

$$P_{R1} = U_m^2 / (2R1) = 10^2 / (2 \cdot 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}; \\ P_{R2} = U_m^2 / (2R2) = 10^2 / (2 \cdot 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

$$P_{R3} = U_m^2 / (2R3) = 10^2 / (2 \cdot 91 \cdot 10^3) = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

5. Выбираем типы резисторов и конденсаторов, входящих в состав схемы (прил. 3 – 5):

R1 - C2-1-0,125-10 кОм±5%;

R2 - C2-1-0,125-10 кОм±5%;

R3 - C2-1-0,125-91 кОм±5%;

C1 – K10-17Б-М47-1000 пФ±5%;

C2 – K10-17Б-М47-47 пФ±5%.

#### 4. 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 6. РАСЧЕТ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ ПЕРВОГО ПОРЯДКА НА БАЗЕ ОУ, ВКЛЮЧЕННОГО ПО СХЕМЕ ИНТЕГРАТОРА

Исходные данные (вариант 00):

верхняя частота  $f_{вФНЧ} = 16 \cdot 10^3$  Гц;

входное сопротивление  $R_{вхФНЧ} \geq 10$  кОм;

сопротивление нагрузки ФНЧ  $R_{нФНЧ} \geq 10$  кОм;

максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ФНЧ  $U_m = 10$ В;

коэффициент усиления по напряжению  $K_{уФНЧ} = 10$ .

#### Электрический расчет

1. Для выбора ОУ определяем требования к значениям параметров ОУ:

1.1. Значение коэффициента усиления по напряжению ФНЧ  $K_{уФНЧ} = 10$ , что позволяет обеспечить необходимую полосу частот, усиливаемых операционным усилителем, который используется в ФНЧ в качестве активного элемента;

1.2. Определяем требования к частоте единичного усиления ОУ ( $f_{1ОУ}$ ) из выражения:

$$f_{1ОУ} \geq 5 \cdot K_{уФНЧ} \cdot f_{вФНЧ} = 5 \cdot 10 \cdot 16 \cdot 10^3 = 800 \cdot 10^3 \text{ Гц};$$

1.3. Определяем требования к скоростным характеристикам ОУ. Для этого вычисляем требуемое значение максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ  $V_{макс}$  из соотношения:

$$V_{макс} > 2\pi \cdot f_{вФНЧ} \cdot U_m = 2 \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 10 = 1 \text{ В/мкс},$$

где  $U_m$  – максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ФНЧ;

1.4. С учетом полученных требований к ОУ на основе паспортных данных (прил. 2, табл. П2.2) выбираем ОУ типа К154УД1 со следующими значениями параметров:

- коэффициент усиления напряжения  $K_u = > 50000$ ;
- максимальная амплитуда выходного напряжения  $U_{\text{вых}}, \text{В} < \pm 11$ ;
- потребляемый ток  $I_{\text{пот}}, \text{мА} \leq 3$ ;
- входное сопротивление  $R_{\text{вх}}, \text{Мом} > 1$ ;
- выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}, \text{Ом} < 30$ ;
- частота единичного усиления  $f_{1\text{ОУ}}, \text{МГц} > 1$ ;
- скорость нарастания выходного напряжения  $V_{\text{макс}}, \text{В/мкс} > 10$ ;
- номинальные напряжения питания  $U_{\text{пит}}, \text{В} \pm 15$ ;
- минимальное сопротивление нагрузки  $R_{\text{н доп}}, \text{кОм} > 2$ .

2. Схема электрическая принципиальная разрабатываемого устройства представлена на рис. 4.4.1:

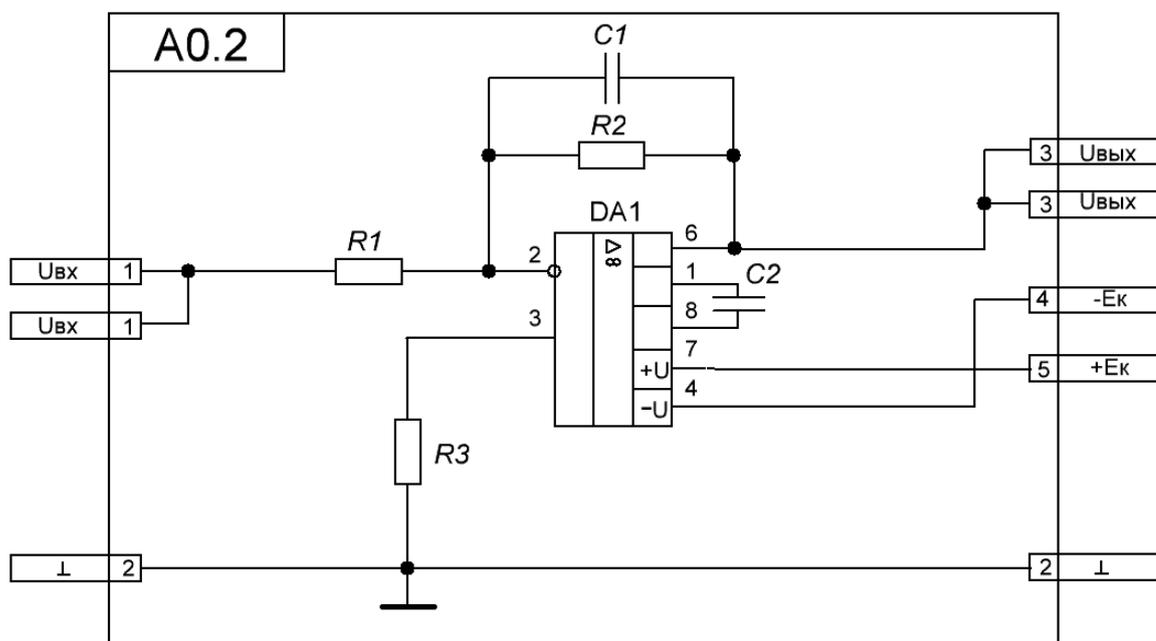


Рис. 4.4.1. Схема электрическая принципиальная активного фильтра нижних частот первого порядка на базе ОУ, включенного по схеме интегратора

3. Определяем номиналы элементов схемы:

3.1. Определяем величину сопротивления резистора  $R1$  из соотношения:

$$R_{\text{вхФНЧ}} \leq R1 \ll R_{\text{вх ОУ}}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. П3.1) выбираем резистор  $R1 = 10 \text{ кОм}$ ;

3.2. Исходя из заданного значения коэффициента усиления напряжения ФНЧ,  $K_{u\text{ФНЧ}}=10$  определяем значение сопротивления  $R_2$  из выражения:

$$R_2 = R_1 \cdot K_{u\text{ФНЧ}} = 10 \cdot 10^3 \cdot 10 = 100 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Проверяем выполнение условия:

$$R_2 \cdot R_{\text{нФНЧ}} / (R_2 + R_{\text{нФНЧ}}) \geq R_{\text{н доп}};$$

$$100 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3 / (100 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3) = 9 \cdot 10^3 \geq 2 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем резистор  $R_2 = 100 \text{ кОм}$ ;

3.3. Значение сопротивления  $R_3$  определяем из выражения:

$$R_3 = R_1 = 10 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем резистор  $R_3 = 10 \text{ кОм}$ .

3.4. Исходя из заданного значения частоты среза ФНЧ  $f_{\text{вФНЧ}}$ , определяем значение емкости конденсатора  $C_1$  из соотношения:

$$C_1 = 1 / (2\pi R_2 f_{\text{вФНЧ}}) = 1 / (2 \cdot 3,14 \cdot 10^5 \cdot 16 \cdot 10^3) \approx 9950 \cdot 10^{-12} \text{ Ф.}$$

Из стандартного 5% ряда номиналов конденсаторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем конденсатор  $C_1 = 10 \text{ нФ}$ ;

3.5. В соответствии с паспортными данными на ОУ типа К1407УД1 для обеспечения устойчивой работы емкость конденсатора  $C_2$  цепи частотной коррекции должна быть равна 4,7 пФ.

4. Определяем максимальные значения мощностей рассеивания для резисторов  $R_1$  и  $R_2$ :

$$P_{R_1} = U_m^2 / (2R_1) = 10^2 / (2 \cdot 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R_2} = U_m^2 / (2R_2) = 10^2 / (2 \cdot 100 \cdot 10^3) = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

5. Выбираем типы резисторов и конденсаторов, входящих в состав схемы (прил. 3 – 5):

$R_1$  - С2-1-0,125-10 кОм $\pm$ 5%;

$R_2$  - С2-1-0,125-100 кОм $\pm$ 5%;

$R_3$  - С2-1-0,125-10 кОм $\pm$ 5%;

$C_1$  – К10-17Б-М47-1000 нФ $\pm$ 5%;

$C_2$  – К10-17Б-М47-47 пФ $\pm$ 5%.

## 4.5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 7.

### РАСЧЕТ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ВЕРХНИХ ЧАСТОТ (ФВЧ) ПЕРВОГО ПОРЯДКА НА ОСНОВЕ ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩЕЙ ЦЕПОЧКИ, ВКЛЮЧЕННОЙ НА ВХОДЕ ОУ

Исходные данные (вариант 00):

частота среза ФВЧ  $f_{\text{ср ФВЧ}} = 130 \text{ Гц}$ ;

верхняя частота среза разрабатываемого устройства  $f_{\text{в}} = 16 \cdot 10^3 \text{ Гц}$ ;

входное сопротивление  $R_{\text{вхФВЧ}} \geq 10 \text{ кОм}$ ;

сопротивление нагрузки ФВЧ  $R_{\text{н ФВЧ}} \geq 10 \text{ кОм}$ ;

максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ФВЧ  $U_{\text{м}} = 10\text{В}$ ;

коэффициент усиления по напряжению ФВЧ  $K_{\text{цФНЧ}} = 10$ .

#### Электрический расчет

1. Для выбора ОУ определяем требования к значениям параметров ОУ:

1.1. Значение коэффициента усиления по напряжению ФВЧ  $K_{\text{цФВЧ}}$  равно 10, что позволяет обеспечить необходимую полосу частот, усиливаемых операционным усилителем, который используется в ФВЧ в качестве активного элемента;

1.2. Определяем требования к частоте единичного усиления ОУ ( $f_{1\text{ОУ}}$ ) из выражения:

$$f_{1\text{ОУ}} \geq 5 \cdot K_{\text{цФВЧ}} \cdot f_{\text{в}} = 5 \cdot 10 \cdot 16 \cdot 10^3 = 800 \cdot 10^3 \text{ Гц};$$

1.3. Определяем требования к скоростным характеристикам ОУ. Для этого вычисляем требуемое значение максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ  $V_{\text{макс}}$  из соотношения:

$$V_{\text{макс}} > 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{в}} \cdot U_{\text{м}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 10 = 1 \text{ В/мкс},$$

где  $U_{\text{м}}$  – максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ФВЧ;

1.4. С учетом полученных требований к ОУ на основе паспортных данных (прил. 2, табл. П2.2) выбираем ОУ типа К154УД1 со следующими параметрами:

коэффициент усиления напряжения  $K_{\text{ц}} = > 50000$ ;

максимальная амплитуда выходного напряжения  $U_{\text{вых}}, \text{В} < \pm 11$ ;

потребляемый ток  $I_{\text{пот}}, \text{мА} \leq 3$ ;

входное сопротивление  $R_{\text{вх}}, \text{МОм} > 1$ ;

выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}, \text{Ом} < 30$ ;

частота единичного усиления  $f_{1\text{ОУ}}, \text{МГц} > 1$ ;

скорость нарастания выходного напряжения  $V_{\text{макс}}, \text{В/мкс} > 10$

номинальные напряжения питания  $U_{\text{пит}}, \text{В} \pm 15$ ;

минимальное сопротивление нагрузки  $R_{\text{н доп}}, \text{кОм} > 2$ .

2. Схема электрическая принципиальная разрабатываемого устройства представлена на рис. 4.5.1:

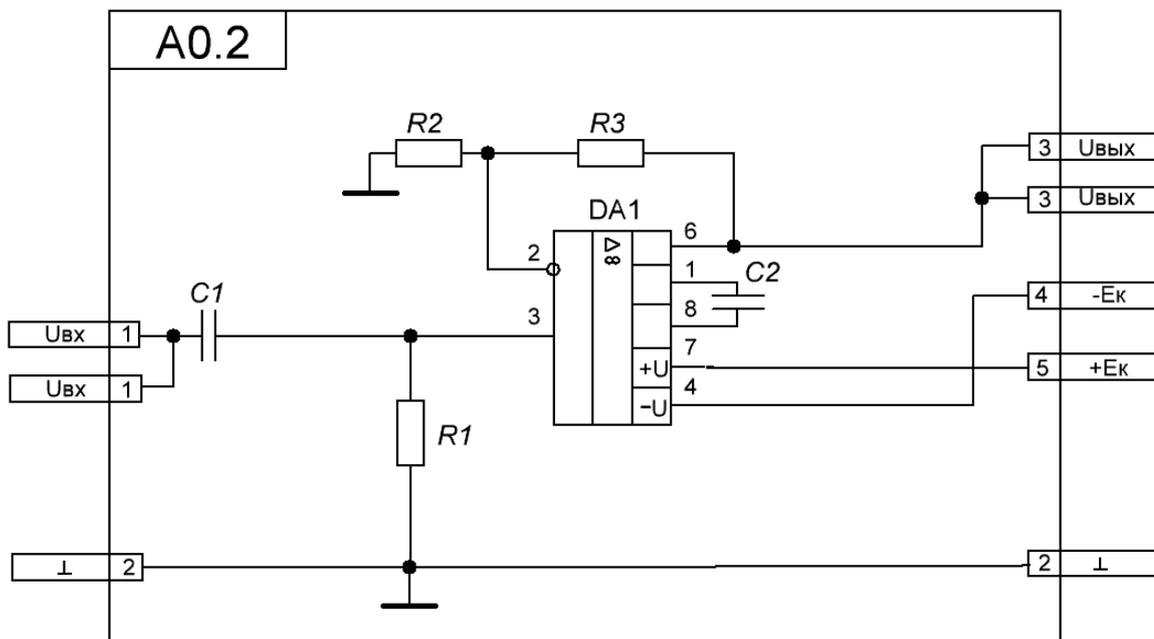


Рис. 4.5.1. Схема электрическая принципиальная активного фильтра верхних частот первого порядка на основе дифференцирующей цепочки, включенной на входе ОУ

3. Определяем номиналы элементов схемы:

3.1. Определяем величину сопротивления резистора R1 из соотношения:

$$R_{\text{вхФВЧ}} \leq R1 \ll R_{\text{вх оу}} .$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем резистор  $R1 = 10 \text{ кОм}$ ;

3.2. Исходя из заданного значения коэффициента усиления по напряжению ФВЧ  $K_{\text{нФВЧ}} = 10$  и условия балансировки ОУ, определяем значения сопротивлений R2 и R3:

$$R2 = R1 = 10 \cdot 10^3 = 10 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

$$R3 = R2(K_{\text{нФВЧ}} - 1) = 10 \cdot 10^3(10 - 1) = 90 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем резистор  $R2 = 10 \text{ кОм}$  и  $R3 = 91 \text{ кОм}$ .

Проверяем выполнение условия:

$$(R2 + R3) R_{\text{нФВЧ}} / (R2 + R3 + R_{\text{нФВЧ}}) \geq R_{\text{н доп}};$$

$$R2 \cdot R_{\text{нФВЧ}} / (R2 + R_{\text{нФВЧ}}) \geq R_{\text{н доп}};$$

$$10 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3 / (10 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^3 \geq 2 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$(10 \cdot 10^3 + 91 \cdot 10^3) 10 \cdot 10^3 / (10 \cdot 10^3 + 91 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3) = 9,9 \cdot 10^3 \geq 2 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

3.3. Исходя из заданного значения частоты среза ФВЧ  $f_{\text{срФВЧ}}$ , определяем значение емкости конденсатора С1 из соотношения:

$$C1 = 1/(2\pi R1 f_{\text{н}}) = 1/(2 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 130) \approx 0,122 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

Из стандартного 5% ряда номиналов конденсаторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем конденсатор  $C1 = 0,12 \text{ мкФ}$ ;

3.4. В соответствии с паспортными данными на ОУ типа К1407УД1 для обеспечения устойчивой работы емкость конденсатора С2 цепи частотной коррекции должна быть равна 4,7 пФ.

4. Определяем максимальные значения мощностей рассеивания для резисторов R1, R2 и R3:

$$P_{R1} = U_m^2 / (2R1) = 10^2 / (2 \cdot 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R2} = U_m^2 / (2R2) = 10^2 / (2 \cdot 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R3} = U_m^2 / (2R3) = 10^2 / (2 \cdot 91 \cdot 10^3) = 0,55 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

5. Выбираем типы резисторов и конденсаторов, входящих в состав схемы (прил. 3 – 5):

R1 - С2-1-0,125-10 кОм $\pm$ 5%;

R2 - С2-1-0,125-10 кОм $\pm$ 5%;

R3 - С2-1-0,125-91 кОм $\pm$ 5%;

C1 - К10-17Б-М1500-0,12 мкФ $\pm$ 10%;

C2 - К10-17Б-М47-4,7 пФ $\pm$ 10%.

#### **4.6. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 8. РАСЧЕТ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ВЕРХНИХ ЧАСТОТ ПЕРВОГО ПОРЯДКА НА БАЗЕ ОУ, ВКЛЮЧЕННОГО ПО СХЕМЕ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ**

Исходные данные (вариант 00):

частота среза ФВЧ  $f_{\text{ср ФВЧ}} = 130 \text{ Гц}$ ;

верхняя частота среза разрабатываемого устройства  $f_{\text{в}} = 16 \cdot 10^3 \text{ Гц}$ ;

входное сопротивление  $R_{\text{вхФВЧ}} \geq 10 \text{ кОм}$ ;

сопротивление нагрузки ФВЧ  $R_{\text{н ФВЧ}} \geq 10 \text{ кОм}$ ;

максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ФВЧ  $U_m = 10 \text{ В}$ ;

коэффициент усиления по напряжению ФВЧ  $K_{\text{иФНЧ}} = 10$ .

Электрический расчет

1. Для выбора ОУ определяем требования к значениям параметров ОУ:

1.1. Значение коэффициента усиления по напряжению ФВЧ  $K_{\text{иФВЧ}} = 10$ , что позволяет обеспечить необходимую полосу частот усиливаемых операционным усилителем, который используется в ФВЧ в качестве активного элемента;

1.2. Определяем требования к частоте единичного усиления ОУ ( $f_{10У}$ ) из выражения:

$$f_{10У} \geq 5 \cdot K_{uФВЧ} \cdot f_B = 50 \cdot 10 \cdot 16 \cdot 10^3 = 800 \cdot 10^3 \text{ Гц};$$

1.3 Определяем требования к скоростным характеристикам ОУ. Для этого вычисляем требуемое значение максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ  $V_{\text{макс}}$  из соотношения:

$$V_{\text{макс}} > 2\pi \cdot f_B \cdot U_m = 2 \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 10 = 1 \text{ В/мкс},$$

где  $U_m$  – максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ФВЧ;

1.4. С учетом полученных требований к ОУ на основе паспортных данных (прил. 2, табл. П2.2) выбираем ОУ типа К154УД1 со следующими параметрами:

коэффициент усиления напряжения  $K_u \Rightarrow 50000$ ;

максимальная амплитуда выходного напряжения  $U_{\text{вых}}, \text{ В} < \pm 11$ ;

потребляемый ток  $I_{\text{пот}}, \text{ мА} \leq 3$ ;

входное сопротивление  $R_{\text{вх}}, \text{ МОм} > 1$ ;

выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}, \text{ Ом} < 30$ ;

частота единичного усиления  $f_{10У}, \text{ МГц} > 1$ ;

скорость нарастания выходного напряжения  $V_{\text{макс}}, \text{ В/мкс} > 10$

номинальные напряжения питания  $U_{\text{пит}}, \text{ В} \pm 15$ ;

минимальное сопротивление нагрузки  $R_{\text{н доп}}, \text{ кОм} > 2$ .

2. Схема электрическая принципиальная разрабатываемого устройства представлена на рис. 4.6.1:

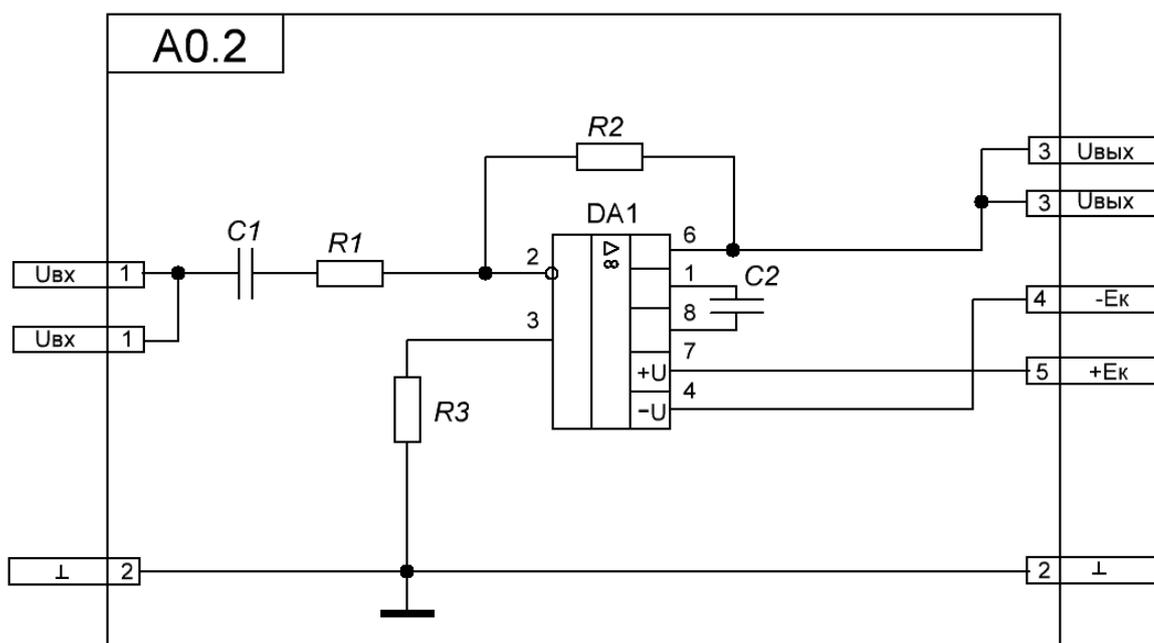


Рис. 4.6.1. Схема электрическая принципиальная активного фильтра верхних частот первого порядка на базе ОУ, включенного по схеме дифференцирования

3. Определяем номиналы элементов схемы:

3.1. Определяем величину сопротивления резистора R1 из соотношения:

$$R_{\text{вхФВЧ}} \leq R1 \ll R_{\text{вх оу}}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем резистор R1 = 10 кОм.

3.2. Исходя из заданного значения коэффициента усиления напряжения ФВЧ  $K_{\text{нФВЧ}}=10$ , определяем значение сопротивления R2 из выражения:

$$R2 = R1 \cdot K_{\text{нФВЧ}} = 10 \cdot 10^3 \cdot 10 = 100 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Проверяем выполнение условия:

$$R2 \cdot R_{\text{нФВЧ}} / (R2 + R_{\text{нФВЧ}}) \geq R_{\text{н доп}} ;$$

$$100 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3 / (100 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3) = 9,1 \cdot 10^3 \geq 2 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем резистор R2 = 100 кОм;

3.3. Значение сопротивления R3 определяем из выражения:

$$R3 = R1 = 10 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем резистор R3 = 10 кОм.

3.4. Исходя из заданного значения частоты среза ФВЧ  $f_{\text{срФВЧ}}$ , определяем значение емкости конденсатора C1 из соотношения

$$C1 = 1 / (2\pi R1 f_{\text{н}}) = 1 / (2 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 130) \approx 0,122 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов конденсаторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем конденсатор C1 = 0,12 мкФ;

3.5. В соответствии с паспортными данными на ОУ типа К1407УД1 для обеспечения устойчивой работы емкость конденсатора C2 цепи частотной коррекции должна быть равна 4,7 пФ.

4. Определяем максимальные значения мощностей рассеивания для резисторов R1 и R2:

$$P_{R1} = P_{R3} = U_m^2 / (2R1) = 10^2 / (2 \cdot 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R2} = U_m^2 / (2R2) = 10^2 / (2 \cdot 100 \cdot 10^3) = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}.$$

5. Выбираем типы резисторов и конденсаторов, входящих в состав схемы (прил. 3 – 5):

R1 - С2-1-0,125-10 кОм±5%;

R2 - С2-1-0,125-100 кОм±5%;

R3 - С2-1-0,125-100 кОм±5%;

C1 - К10-17Б-М1500-0,12 мкФ±10%;

C2 - К10-17Б-М47-4,7 пФ±10%.

#### **4.7. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 9. РАСЧЕТ АКТИВНОГО ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА (ПФ) ПЕРВОГО ПОРЯДКА НА ОСНОВЕ ОУ**

Исходные данные (вариант 00):

нижняя частота среза разрабатываемого устройства  $f_{нПФ} = 1050 \text{ Гц}$ ;

верхняя частота среза разрабатываемого устройства  $f_{вПФ} = 16 \cdot 10^3 \text{ Гц}$ ;

входное сопротивление  $R_{вхПФ} \geq 10 \text{ кОм}$ ;

сопротивление нагрузки ПФ  $R_{нПФ} \geq 10 \text{ кОм}$ ;

максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ПФ  $U_m = 10 \text{ В}$ .

коэффициент усиления по напряжению ПФ  $K_{уПФ} = 10$ .

#### Электрический расчет

1. Для выбора ОУ определяем требования к значениям параметров ОУ:

1.1. Значение коэффициента усиления по напряжению ПФ  $K_{уПФ} = 10$ , что позволяет обеспечить необходимую полосу частот, усиливаемых операционным усилителем, который используется в ПФ в качестве активного элемента;

1.2. Определяем требования к частоте единичного усиления ОУ  $f_{1ОУ}$  из выражения:

$$f_{1ОУ} \geq 5 \cdot K_{уПФ} \cdot f_v = 5 \cdot 10 \cdot 16 \cdot 10^3 = 800 \cdot 10^3 \text{ Гц};$$

1.3. Определяем требования к скоростным характеристикам ОУ. Для этого вычисляем требуемое значение максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ  $V_{\text{макс}}$  из соотношения:

$$V_{\text{макс}} > 2\pi \cdot f_{вПФ} \cdot U_m = 2 \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 10 = 1 \text{ В/мкс},$$

где  $U_m$  – максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ПФ;

1.4. С учетом полученных требований к ОУ на основе паспортных данных (прил. 2, табл. П2.2) выбираем ОУ типа К154УД1 со следующими параметрами:

- коэффициент усиления напряжения,  $K_u \Rightarrow 50000$ ;
- максимальная амплитуда выходного напряжения,  $U_{\text{вых}}, \text{В} < \pm 11$ ;
- потребляемый ток  $I_{\text{пот}}, \text{мА} \leq 3$ ;
- входное сопротивление  $R_{\text{вх}}, \text{МОм} > 1$ ;
- выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}, \text{Ом} < 30$ ;
- частота единичного усиления  $f_{1\text{ОУ}}, \text{МГц} > 1$ ;
- скорость нарастания выходного напряжения  $V_{\text{макс}}, \text{В/мкс} > 10$ ;
- номинальные напряжения питания  $U_{\text{пит}}, \text{В} \pm 15$ ;
- минимальное сопротивление нагрузки,  $R_{\text{н доп}}, \text{кОм} > 2$ .

2. Схема электрическая принципиальная разрабатываемого устройства представлена на рис. 4.7.1:

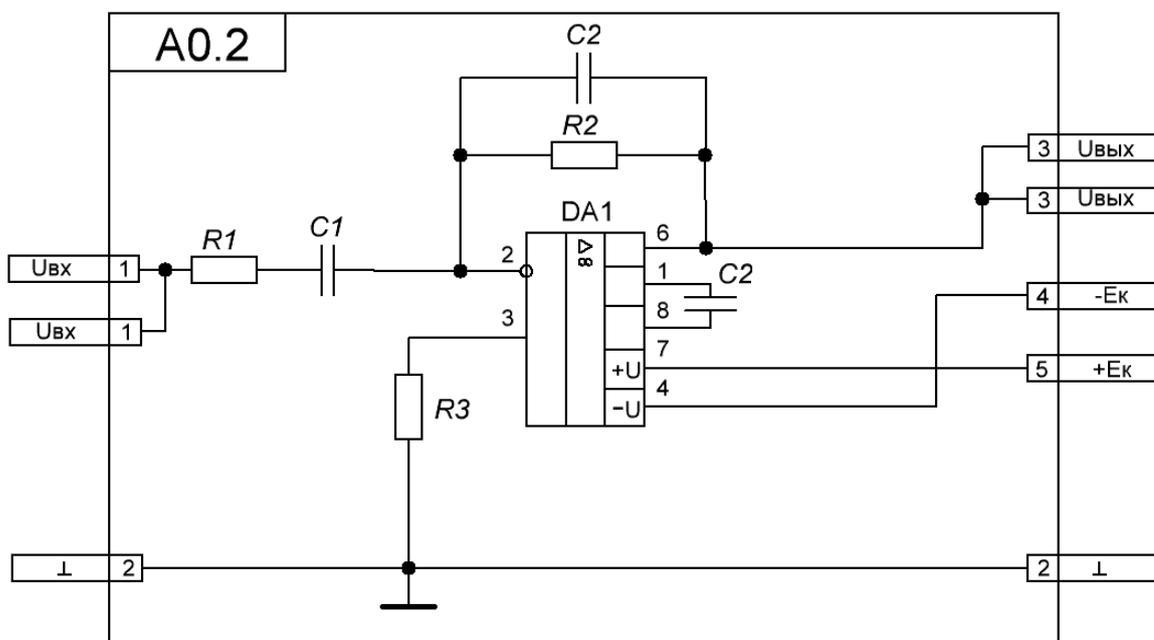


Рис. 4.7.1. Схема электрическая принципиальная активного полосового фильтра первого порядка на основе ОУ

3. Определяем номиналы элементов схемы:

3.1. Определяем величину сопротивления резистора  $R1$  из соотношения:

$$R_{\text{вхПФ}} \leq R1 \ll R_{\text{вх ОУ}}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. П3.1) выбираем резистор  $R1 = 10 \text{ кОм}$ ;

3.2. Исходя из заданного значения коэффициента усиления напряжения ПФ  $K_{\text{нПФ}} = 10$ , определяем значение сопротивления  $R_2$  из выражения:

$$R_2 = R_1 \cdot K_{\text{нПФ}} = 10 \cdot 10^3 \cdot 10 = 100 \cdot 10^3.$$

Проверяем выполнение условия:

$$R_2 \cdot R_{\text{нПФ}} / (R_2 + R_{\text{нПФ}}) \geq R_{\text{н доп}};$$

$$100 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3 / (100 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3) = 9,1 \cdot 10^3 \geq 2 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем резистор  $R_2 = 100 \text{ кОм}$ ;

3.3. Значение сопротивления  $R_3$  определяем из выражения:

$$R_3 = R_1 = 10 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем резистор  $R_3 = 10 \text{ кОм}$ ;

3.4. Исходя из заданного значения частоты среза ПФ  $f_{\text{нПФ}}$ , определяем значение емкости конденсатора  $C_1$  из соотношения:

$$C_1 = 1/(2\pi R_1 f_{\text{нПФ}}) = 1/(2 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 1050) \approx 15 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

Из стандартного 5% ряда номиналов конденсаторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем конденсатор  $C_1 = 15 \text{ нФ}$ ;

3.5. Исходя из заданного значения частоты среза ПФ  $f_{\text{вПФ}}$ , определяем значение емкости конденсатора  $C_2$  из соотношения:

$$C_2 = 1/(2\pi R_2 f_{\text{вПФ}}) = 1/(2 \cdot 3,14 \cdot 10^5 \cdot 16 \cdot 10^3) \approx 99,5 \cdot 10^{-12} \text{ Ф.}$$

Из стандартного 5% ряда номиналов конденсаторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем конденсатор  $C_1 = 0,1 \text{ нФ}$ ;

3.6. В соответствии с паспортными данными на ОУ типа К1407УД1 для обеспечения устойчивой работы емкость конденсатора  $C_2$  цепи частотной коррекции должна быть равна 4,7 пФ.

4. Определяем максимальные значения мощностей рассеивания для резисторов  $R_1$  и  $R_2$ :

$$P_{R_1} = P_{R_3} = U_m^2 / (2R_1) = 10^2 / (2 \cdot 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R_2} = U_m^2 / (2R_2) = 10^2 / (2 \cdot 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

5. Выбираем типы резисторов и конденсаторов, входящих в состав схемы (прил. 3 – 5):

R1, R3 - C2-1-0,125-10 кОм±5%;  
 R2 - C2-1-0,125-100 кОм±5%;  
 C1 – K10-17Б-M1500-0,015 мкФ±5%;  
 C2 - K10-17Б-M47-100 пФ±5%;  
 C3 – K10-17Б-M47-4,7 пФ±5%

#### 4.8. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 10. РАСЧЕТ ВХОДНОГО КАСКАДА НА БАЗЕ НЕИНВЕРТИРУЮЩЕГО ВКЛЮЧЕНИЯ ОУ

Исходные данные (вариант 00):

входное сопротивление  $R_{вх} \geq 25$  кОм;  
 коэффициент усиления по напряжению  $K_{уос} = 10$ ;  
 сопротивление нагрузки  $R_{н} \geq 10$  кОм;  
 нижняя частота полосы пропускания УНЧ  $f_{н} = 0$  Гц;  
 верхняя частота полосы пропускания УНЧ  $f_{в} = 16$  КГц;  
 максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ОУ  $U_{м} = 9$  В.

1. Определяем требования к частоте единичного усиления ОУ  $f_{1ОУ}$ :

$$f_{1ОУ} \geq 5 \cdot K_{уос} \cdot f_{в} = 5 \cdot 10 \cdot 16 \cdot 10^3 = 0,8 \cdot 10^6 \text{ Гц,}$$

и к максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ  $V_{макс}$ :

$$V_{макс} > 2\pi \cdot f_3 \cdot U_{м} = 2 \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 9 = 0,9 \text{ В/мкс.}$$

С учетом полученных требований к ОУ на основе паспортных данных (прил. 2, табл. П2.2) выбираем ОУ типа К544УД2 со следующими параметрами:

коэффициент усиления напряжения  $K_{и} \geq 20000$ ;  
 максимальная амплитуда выходного напряжения  $U_{вых}, В < \pm 10$ ;  
 потребляемый ток  $I_{пот}, мА \leq 7$ ;  
 входное сопротивление  $R_{вх}, МОм > 10$ ;  
 выходное сопротивление  $R_{вых}, Ом < 30$ ;  
 частота единичного усиления,  $f_1, МГц > 15$ ;  
 скорость нарастания выходного напряжения  $V_{макс}, В/мкс > 20$ ;  
 номинальные напряжения питания  $U_{пит}, В \pm 15$ ;  
 минимальное сопротивление нагрузки  $R_{н доп}, кОм = 2$ .

2. Схема электрическая принципиальная разрабатываемого устройства представлена на рис. 4.8.1.

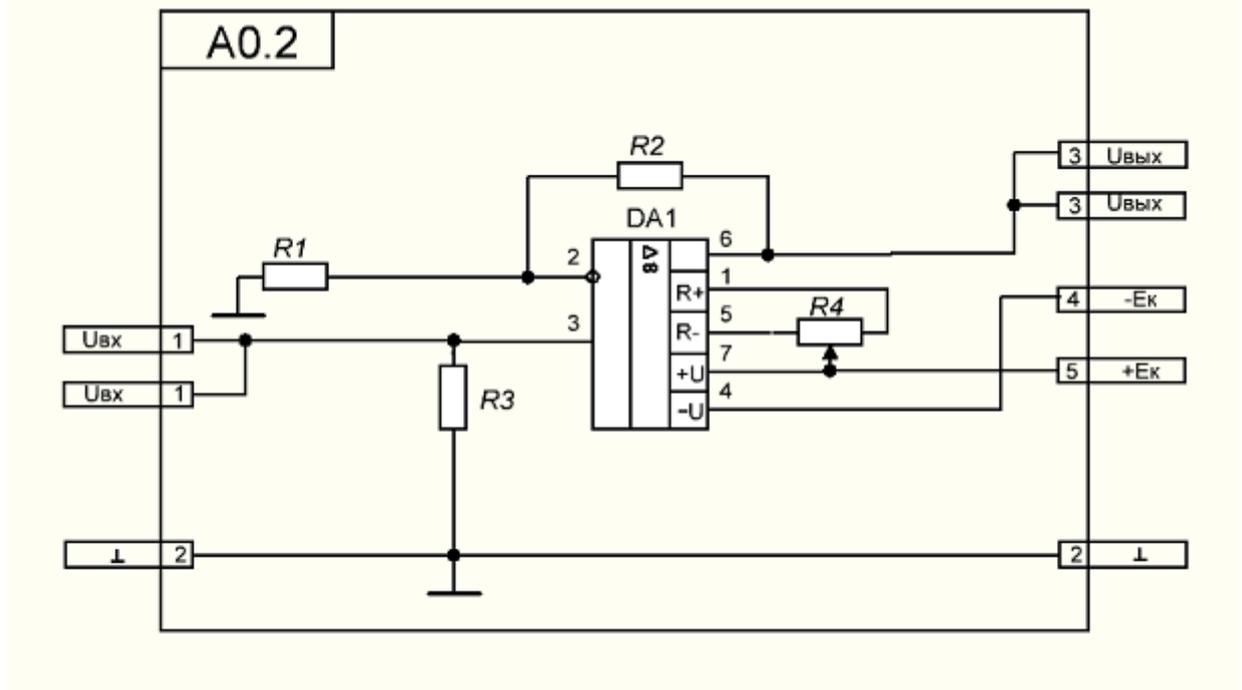
3. Определяем номинальные значения параметров элементов схемы:

3.1. Определяем значение сопротивления резистора R3 из соотношений:

$$R_{вх} \leq R3 \ll R_{вх ОУ};$$

$$0,025 \text{ МОм} \leq R3 \ll 10 \text{ МОм}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 6.3, табл. 6.3.1) выбираем резистор  $R3 = 27 \text{ кОм}$ ;



4.8.1. Схема электрическая принципиальная входного каскада на базе неинвертирующего включения ОУ

3.2. Исходя из заданного значения коэффициента усиления  $K_{\text{уос}}$  определяем величины сопротивлений резисторов цепи обратной связи  $R1$  и  $R2$ :

$$R1 = R3 = 27 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$R2 = R1(K_{\text{уос}} - 1) = 27 \cdot 10^3(10 - 1) = 243 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем резистор  $R2 = 240 \text{ кОм}$ , резистор  $R1 = 27 \text{ кОм}$ .

Проверяем выполнение условия:

$$(R2 + R1) \cdot R_{\text{н}} / (R2 + R1 + R_{\text{н}}) \geq R_{\text{н доп}};$$

$$(240 + 27) \cdot 10 / (240 + 27 + 10) = 9,6 \text{ кОм} \geq 2 \text{ кОм};$$

3.3. Определяем значение сопротивления резистора балансировки нуля ОУ  $R4$  из паспортных данных микросхемы К544УД1А:

$$R4 = 10 \text{ кОм}.$$

4. Определяем максимальные значения мощностей рассеивания для резисторов R1, R2 и R3:

$$P_{R1} = P_{R3} = U_m^2 / (2R1) = 9^2 / (2 \cdot 27 \cdot 10^3) = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R2} = U_m^2 / (2R2) = 9^2 / (2 \cdot 240 \cdot 10^3) = 0,16 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

5. Выбираем типы резисторов и конденсаторов, входящих в состав схемы (прил. 3 – 5):

R1 - С2-1-0,125-30 кОм±5%;

R2 - С2-1-0,125-270 кОм±5%;

R3 - С2-1-0,125-27 кОм±5%;

R4 - СП5-16ВА-0,5-10кОм±10%;

C1 - К53-4-6В-33 мкФ±5%.

#### **4.9 ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 11. РАСЧЕТ ВХОДНОГО КАСКАДА НА БАЗЕ ИНВЕРТИРУЮЩЕГО ВКЛЮЧЕНИЯ ОУ**

Исходные данные (вариант 00):

входное сопротивление  $R_{вх} \geq 25 \text{ кОм}$ ;

коэффициент усиления по напряжению  $K_{уос} = 10$ ;

сопротивление нагрузки  $R_n \geq 10 \text{ кОм}$ ;

нижняя частота полосы пропускания УНЧ  $f_n = 0 \text{ Гц}$ ;

верхняя частота полосы пропускания УНЧ  $f_b = 16 \text{ КГц}$ ;

максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ОУ  $U_m = 9 \text{ В}$ .

1. Определяем требования к частоте единичного усиления ОУ  $f_{1ОУ}$ :

$$f_{1ОУ} \geq 5 \cdot K_{уос} \cdot f_b = 5 \cdot 10 \cdot 16 \cdot 10^3 = 0,8 \cdot 10^6 \text{ Гц},$$

и к максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ  $V_{\text{макс}}$ :

$$V_{\text{макс}} > 2\pi \cdot f_3 \cdot U_m = 2 \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 9 = 0,9 \text{ В/мкс.}$$

С учетом полученных требований к ОУ на основе паспортных данных (прил. 2, табл. П2.2) выбираем ОУ типа К544УД2 со следующими параметрами:

коэффициент усиления напряжения,  $K_u \Rightarrow 20000$ ;

максимальная амплитуда выходного напряжения  $U_{\text{вых}}, \text{ В} < \pm 10$ ;

потребляемый ток  $I_{\text{пот}}, \text{ мА} \leq 7$ ;

входное сопротивление,  $R_{\text{вх}}, \text{ МОм} > 10$ ;

выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}, \text{ Ом} < 30$ ;

частота единичного усиления,  $f_1, \text{ МГц} > 15$ ;

скорость нарастания выходного напряжения,  $V_{\text{макс}}, \text{ В/мкс} > 20$

номинальные напряжения питания,  $U_{\text{пит}}, \text{ В} \pm 15$ ;

минимальное сопротивление нагрузки,  $R_{н доп}$ , кОм = 2.

2. Схема электрическая принципиальная разрабатываемого устройства представлена на рис. 4.9.1.

3. Определяем номинальные значения параметров элементов схемы:

3.1. Определяем значение сопротивления резистора R1 из соотношений:

$$R_{вх} \leq R1 \ll R_{вх ОУ};$$

$$0,25 \text{ МОм} \leq R1 \ll 10 \text{ Мом}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем резистор  $R1 = 27 \text{ кОм}$ .

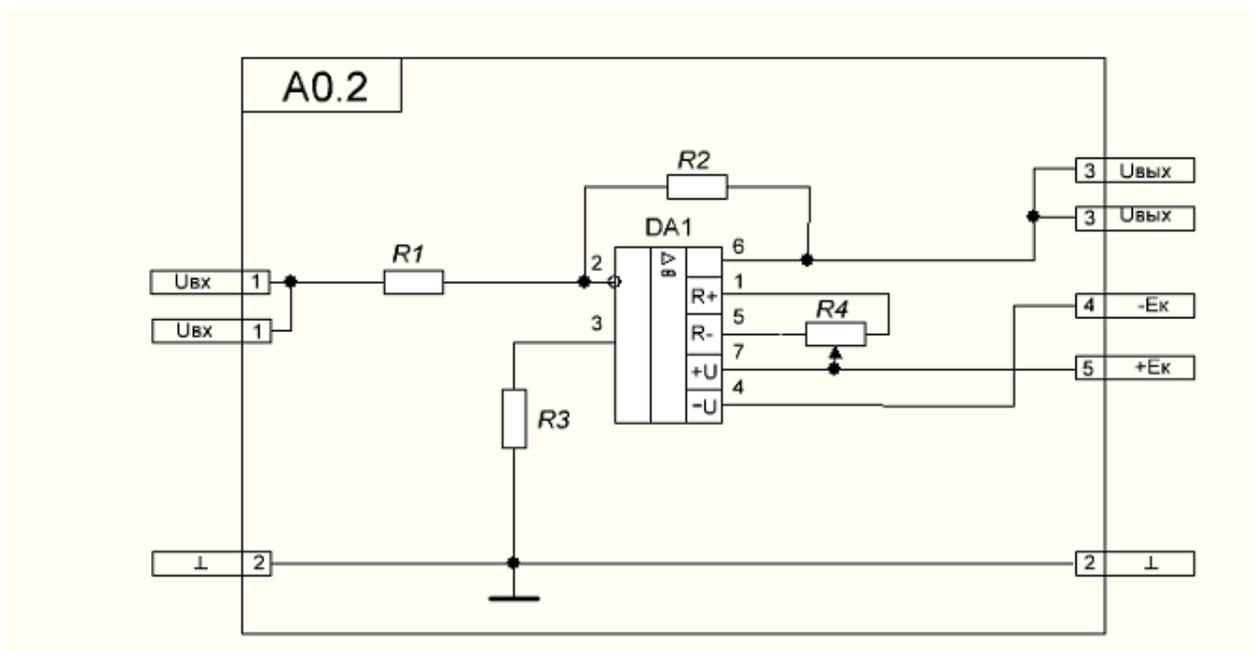


Рис. 4.9.1. Схема электрическая принципиальная входного каскада на базе инвертирующего включения ОУ

3.2. Исходя из выбранной схемы включения ОУ и заданного значения  $K_{иос}$ , вычисляем значение сопротивления резистора R2:

$$R2 = R1 \cdot K_{иос} = 27 \cdot 10^3 \cdot 10 = 270 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (прил. 3, табл. ПЗ.1) выбираем резистор  $R2=270 \text{ кОм}$ .

Проверяем выполнение условий:

$$R2 \cdot R_{н}/(R2 + R_{н}) \geq R_{н доп};$$

$$(270 + 30) \cdot 10 / (270 + 30 + 10) = 9,6 \text{ кОм} \geq 2 \text{ кОм};$$

$$R_2 \ll R_{\text{вх ОУ}};$$

$$2 \text{ кОм} \ll 10 \text{ кОм};$$

3.3. Значение сопротивления резистора R3 определяем из выражения:

$$R_3 = R_1 = 27 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

3.4. Определяем значение сопротивления резистора балансировки нуля ОУ R4 из паспортных данных микросхемы К544УД1А:

$$R_4 = 10 \text{ кОм}.$$

4. Определяем максимальные значения мощностей рассеивания для резисторов R1 и R2:

$$P_{R1} = P_{R3} = U_m^2 / 2R_1 = 9^2 / 2 \cdot 27 \cdot 10^3 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R2} = U_m^2 / 2R_2 = 9^2 / (2 \cdot 270 \cdot 10^3) = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}.$$

5. Выбираем типы резисторов и конденсаторов, входящих в состав схемы (прил. 3 – 5):

R1 - С2-1-0,125-27 кОм±5%;

R2 - С2-1-0,125-270 кОм±5%;

R3 - С2-1-0,125-27 кОм±5%;

R4 - СП5-16ВА-0,5-10кОм±10%.

## 5. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ И ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

### 5.1. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

№ варианта соответствует порядковому номеру слушателя в учебном журнале на момент времени получения задания

Таблица 5.1.1

№ ВАРИАНТА	U <sub>ВХ</sub> , 10 <sup>-3</sup> В	R <sub>ВХ</sub> , 10 <sup>3</sup> Ом, НЕ МЕНЕЕ	ЧАСТОТЫ СРЕЗА АЧХ					K <sub>У</sub> , дБ в ПОЛОСЕ ПРОПУСКАНИЯ	R <sub>н</sub> , Ом	R <sub>н</sub> , ВА	U <sub>н</sub> , В	РЕЖИМ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРОВ ОК УМ
			ФОРМА АЧХ	f <sub>1</sub> , Гц	f <sub>2</sub> , Гц	f <sub>3</sub> , кГц	f <sub>4</sub> , кГц					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
00		25	Рис.2.1	130	1050	16		40	50	0,35		АВ
1-1		30	Рис.2.1	15	160	3,50		79	4		9	АВ
1-2		35	Рис.2.2	24	510	3,6		74	8		10	АВ
1-3		45	Рис.2.3	16	510	5,1	13	71	16		11	АВ
1-4		50	Рис.2.2	90	510	5,1		69	4		12	АВ
1-5		60	Рис.2.5	49	820	4,1	20	68	8		13	АВ
1-6		70	Рис.2.6	20	130	1,1	10,5	67	16		14	АВ
1-7		75	Рис.2.7	1800	5100	11		66	4		15	АВ
1-8		80	Рис.2.1	60	620	9,1		61	8		9	АВ
1-9		85	Рис.2.2	120	1800	15		60	16		10	АВ
1-10		90	Рис.2.3	27	750	6,8	17	60	4		11	АВ
1-11		100	Рис.2.2	10	50	6,2		60	8		12	АВ
1-12		110	Рис.2.5	23	710	2,9	11	60	16		13	АВ
1-13		120	Рис.2.6	10	82	610	6,2	56	4		9	АВ
1-14		130	Рис.2.7	1000	3100	7,1		57	8		10	АВ
1-15		140	Рис.2.1	100	1100	16		57	16		11	АВ
1-16		150	Рис.2.2	75	910	7,5		57	4		12	АВ
1-17		160	Рис.2.3	51	1200	10	27	57	8		13	АВ
1-18		170	Рис.2.2	20	220	12,2		54	16		9	АВ
1-19		180	Рис.2.5	15	600	2,5	8,5	54	4		10	АВ
1-20		190	Рис.2.6	33	240	2,1	22,5	54	8		11	АВ
1-21		200	Рис.2.7	3000	12000	25		55	16		12	АВ
1-22		210	Рис.2.1	30	330	6,2		55	4		13	АВ
1-23		220	Рис.2.2	91	1200	9,1		51	8		9	АВ
1-24		230	Рис.2.3	21	620	5,6	15	52	16		10	АВ
1-25		240	Рис.2.2	15	70	10,5		52	4		11	АВ
1-26		250	Рис.2.5	36	760	3,5	16,5	53	8		12	АВ

1-27		260	Рис.2.6	24	180	1,65	15,5	53	16		13	АВ
1-28		270	Рис.2.7	1400	4300	18,1		50	4		9	АВ
1-29		280	Рис.2.1	80	820	12		50	8		10	АВ
1-30		290	Рис.2.2	45	680	5,1		51	16		11	АВ

Продолжение табл. 5.1.1

№ ВАРИАНТА	U <sub>ВХ</sub> , 10 <sup>-3</sup> В	R <sub>ВХ</sub> , 10 <sup>3</sup> Ом, НЕ МЕНЕЕ	ЧАСТОТЫ СРЕЗА АЧХ					K <sub>У</sub> , дБ в ПОЛОСЕ ПРОПУСКАНИЯ	R <sub>Н</sub> , Ом	P <sub>Н</sub> , ВА	U <sub>Н</sub> , В	РЕЖИМ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРОВ ОК УМ
			ФОРМА АЧХ	F <sub>1</sub> , Гц	F <sub>2</sub> , Гц	F <sub>3</sub> , КГц	F <sub>4</sub> , КГц					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
00		25	Рис.2.1	130	1050	16		40	50	0,35		АВ
2-1	1	30	Рис.2.1	15	160	3,50		79	4			АВ
2-2	2	35	Рис.2.2	24	510	3,6		74	8			АВ
2-3	3	45	Рис.2.3	16	510	5,1	13	71	16			АВ
2-4	4	50	Рис.2.2	90	510	5,1		69	4			АВ
2-5	5	60	Рис.2.5	49	820	4,1	20	68	8			АВ
2-6	6	70	Рис.2.6	20	130	1,1	10,5	67	16			АВ
2-7	7	75	Рис.2.7	1800	5100	11		66	4			АВ
2-8	8	80	Рис.2.1	60	620	9,1		61	8			АВ
2-9	9	85	Рис.2.2	120	1800	15		60	16			АВ
2-10	10	90	Рис.2.3	27	750	6,8	17	60	4			АВ
2-11	11	100	Рис.2.2	10	50	6,2		60	8			АВ
2-12	12	110	Рис.2.5	23	710	2,9	11	60	16			АВ
2-13	13	120	Рис.2.6	10	82	610	6,2	56	4			АВ
2-14	14	130	Рис.2.7	1000	3100	7,1		57	8			АВ
2-15	15	140	Рис.2.1	100	1100	16		57	16			АВ
2-16	16	150	Рис.2.2	75	910	7,5		57	4			АВ
2-17	17	160	Рис.2.3	51	1200	10	27	57	8			АВ
2-18	18	170	Рис.2.2	20	220	12,2		54	16			АВ
2-19	19	180	Рис.2.5	15	600	2,5	8,5	54	4			АВ
2-20	20	190	Рис.2.6	33	240	2,1	22,5	54	8			АВ
2-21	21	200	Рис.2.7	3000	12000	25		55	16			АВ
2-22	22	210	Рис.2.1	30	330	6,2		55	4			АВ
2-23	23	220	Рис.2.2	91	1200	9,1		51	8			АВ
2-24	24	230	Рис.2.3	21	620	5,6	15	52	16			АВ
2-25	25	240	Рис.2.2	15	70	9,5		52	4			АВ
2-26	26	250	Рис.2.5	36	760	3,5	16,5	53	8			АВ
2-27	27	260	Рис.2.6	24	180	1,65	15,5	53	16			АВ
2-28	28	270	Рис.2.7	1400	4300	18,1		50	4			АВ
2-29	29	280	Рис.2.1	80	820	12		50	8			АВ
2-30	30	290	Рис.2.2	45	680	5,1		51	16			АВ

Продолжение табл. 5.1.1

№ ВАРИАНТА	U <sub>ВХ</sub> , 10 <sup>-3</sup> В	R <sub>ВХ</sub> , 10 <sup>3</sup> Ом, НЕ МЕНЕЕ	ЧАСТОТЫ СРЕЗА АЧХ					КУ, дБ в ПОЛОСЕ ПРОПУСКАНИЯ	R <sub>н</sub> , Ом	P <sub>н</sub> , ВА	U <sub>н</sub> , В	РЕЖИМ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРОВ ОК УМ
			ФОРМА АЧХ	F <sub>1</sub> , Гц	F <sub>2</sub> , Гц	F <sub>3</sub> , КГц	F <sub>4</sub> , КГц					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
00		25	Рис.2.1	130	1050	16		40	50	0,35		АВ
3-1	1	30	Рис.2.1	15	160	3,50				10	9	АВ
3-2	2	35	Рис.2.2	24	510	3,6				6	10	АВ
3-3	3	45	Рис.2.3	16	510	5,1	13			3,7	11	АВ
3-4	4	50	Рис.2.2	90	510	5,1				18	12	АВ
3-5	5	60	Рис.2.5	49	820	4,1	20			10	13	АВ
3-6	6	70	Рис.2.6	20	130	1,1	10,5			6	14	АВ
3-7	7	75	Рис.2.7	1800	5100	11				28	15	АВ
3-8	8	80	Рис.2.1	60	620	9,1				5,6	9	АВ
3-9	9	85	Рис.2.2	120	1800	15				0,8	10	АВ
3-10	10	90	Рис.2.3	27	750	6,8	17			18	11	АВ
3-11	11	100	Рис.2.2	10	50	6,2				9	12	АВ
3-12	12	110	Рис.2.5	23	710	2,9	11			5,2	13	АВ
3-13	3	120	Рис.2.6	10	82	610	6,2			10,1	9	АВ
3-14	14	130	Рис.2.7	1000	3100	7,1				6,25	10	АВ
3-15	15	140	Рис.2.1	100	1100	16				3,7	11	АВ
3-16	16	150	Рис.2.2	75	910	7,5				18	12	АВ
3-17	17	160	Рис.2.3	51	1200	10	27			10,5	13	АВ
3-318	18	170	Рис.2.2	20	220	12,2				2,5	9	АВ
3-19	19	180	Рис.2.5	15	600	2,5	8,5			12,5	10	АВ
3-20	20	190	Рис.2.6	33	240	2,1	22,5			7,5	11	АВ
3-21	21	200	Рис.2.7	3000	12000	25				4,5	12	АВ
3-22	22	210	Рис.2.1	30	330	6,2				21	13	АВ
3-23	23	220	Рис.2.2	91	1200	9,1				5	9	АВ
3-24	24	230	Рис.2.3	21	620	5,6	15			6	10	АВ
3-25	25	240	Рис.2.2	15	70	7,5				3,1	11	АВ
3-26	26	250	Рис.2.5	36	760	3,5	16,5			9	12	АВ
3-27	27	260	Рис.2.6	24	180	1,65	15,5			5,2	13	АВ
3-28	328	270	Рис.2.7	1400	4300	18,1				10,1	9	АВ
3-29	29	280	Рис.2.1	80	820	12				6,2	10	АВ
3-30	30	290	Рис.2.2	45	680	5,1				3,7	11	АВ

## 5.2. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

### 5.2.1. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ 1 - 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Исходные данные:(вариант № 00)

Входное сопротивление  $R_{вх} = 10$  кОм;

Коэффициент усиления по напряжению  $K_{уос} = 10$ ;

Сопротивление нагрузки  $R_{н} = 50$  Ом;

Мощность в нагрузке  $P_{н} = 350$  мВт;

Нижняя граничная частота  $f_{н} = 300$  Гц;

Верхняя граничная частота  $f_{в} = 3$  кГц;

Режим работы оконечных транзисторов: В.

Таблица 5.2.1

ВАРИАНТ	$K_{УОС}$	$R_{ВХ}$ , КОМ	$R_{Н}$ , ОМ	$P_{Н}$ , ВТ	$f_{Н}$ , ГЦ	$f_{В}$ , КГЦ	РЕЖИМ РАБОТЫ
1-1	5	10	4	10	0	9	В
1-2	6	11	8	16	0	10	В
1-3	7	12	16	3,7	0	11	В
1-4	8	13	4	18	0	12	В
1-5	9	14	8	10	0	13	В
1-6	10	15	16	6	0	14	В
1-7	11	16	4	28	0	15	В
1-8	12	17	8	5,6	0	16	В
1-9	13	18	16	0,8	0	17	В
1-10	14	19	4	18	0	18	В
1-11	15	20	8	9	0	19	В
1-12	16	21	16	5,2	0	20	В
1-13	17	22	4	10,1	0	21	В
1-14	18	23	8	6,25	0	22	В
1-15	19	24	16	3,7	0	23	В
1-16	20	25	4	18	0	24	В
1-17	21	26	8	10,5	0	25	В
1-18	22	27	16	2,5	0	26	В
1-19	23	28	4	12,5	0	27	В
1-20	24	29	8	7,5	0	28	В
1-21	25	30	16	4,5	0	29	В
1-22	26	31	4	21	0	30	В
1-23	27	32	8	5	0	31	В
1-24	28	33	16	6	0	32	В
1-25	29	34	4	3,1	0	33	В
1-26	30	35	8	9	0	34	В

1-27	31	36	16	5,2	0	35	В
1-28	32	37	4	10,1	0	36	В
1-29	33	38	8	6,2	0	37	В
1-30	34	39	16	3,7	0	38	В

Продолжение табл. 5.2.1

ВАРИАНТ	$K_{UOC}$	$R_{BX}, КОМ$	$R_H, Ом$	$P_H, Вт$	$f_H, Гц$	$f_B, кГц$	РЕЖИМ РАБОТЫ
2-1	15	10	4	10	300	19	В
2-2	16	11	8	16	290	20	В
2-3	17	12	16	3,7	280	21	В
2-4	18	13	4	18	270	22	В
2-5	19	14	8	10	260	23	В
2-6	10	15	16	6	250	14	В
2-7	11	16	4	28	240	15	В
2-8	12	17	8	5,6	230	26	В
2-9	13	18	16	0,8	220	27	В
2-10	14	19	4	18	210	18	В
2-11	5	20	8	9	200	19	В
2-12	6	21	16	5,2	190	20	В
2-13	7	22	4	10,1	180	21	В
2-14	8	23	8	6,25	170	22	В
2-15	9	24	16	3,7	160	23	В
2-16	10	25	4	18	150	24	В
2-17	11	26	8	10,5	140	35	В
2-18	12	27	16	2,5	130	26	В
2-19	13	28	4	12,5	120	27	В
2-20	14	29	8	7,5	110	28	В
2-21	25	130	16	4,5	100	29	В
2-22	26	140	4	21	90	30	В
2-23	27	150	8	5	85	31	В
2-24	28	160	16	6	80	32	В
2-25	29	170	4	3,1	75	33	В
2-26	30	180	8	9	70	34	В
2-27	31	190	16	5,2	65	35	В
2-28	32	200	4	10,1	60	36	В
2-29	33	210	8	6,2	55	37	В
2-30	34	220	16	3,7	50	38	В

Продолжение табл. 5.2.1

ВАРИАНТ	$K_{UOC}$	$R_{BX}, КОМ$	$R_H, Ом$	$P_H, Вт$	$f_H, Гц$	$f_B, кГц$	РЕЖИМ РАБОТЫ
3-1	25	100	4	10	100	9	В
3-2	26	110	8	16	90	10	В
3-3	27	120	16	3,7	80	11	В
3-4	28	130	4	18	70	12	В
3-5	29	140	8	10	60	13	В
3-6	30	150	16	6	50	14	В
3-7	31	160	4	28	40	15	В
3-8	32	170	8	5,6	30	16	В
3-9	33	180	16	0,8	20	17	В
3-10	34	190	4	18	10	8	В
3-11	35	200	8	9	110	29	В
3-12	36	25	16	5,2	120	30	В
3-13	37	30	4	10,1	130	31	В
3-14	38	35	8	6,25	140	32	В
3-15	39	40	16	3,7	150	33	В
3-16	10	45	4	18	160	34	В
3-17	11	50	8	10,5	170	35	В
3-18	12	55	16	2,5	180	36	В
3-19	13	60	4	12,5	190	37	В
3-20	14	65	8	7,5	200	38	В
3-21	15	70	16	4,5	210	39	В
3-22	16	75	4	21	220	200	В
3-23	17	80	8	5	230	21	В
3-24	18	85	16	6	240	22	В
3-25	19	90	4	3,1	250	23	В
3-26	20	95	8	9	260	24	В
3-27	21	100	16	5,2	270	25	В
3-28	22	110	4	10,1	280	26	В
3-29	23	120	8	6,2	290	27	В
3-30	24	130	16	3,7	300	28	В

## 5.2.2. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ 3 - 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Исходные данные:(вариант № 00)

Входное сопротивление  $R_{вх} = 10$  кОм;

Коэффициент усиления по напряжению  $K_{уос} = 10$ ;

Сопротивление нагрузки  $R_{н} = 50$  Ом;

Мощность в нагрузке  $P_{н} = 350$  мВт;

Нижняя граничная частота  $f_{н} = 0$  Гц;

Верхняя граничная частота  $f_{в} = 3$  кГц;

Режим работы оконечных транзисторов: А - В.

Таблица 5.2.2

ВАРИАНТ	$K_{уос}$	$R_{вх}$ , КОМ	$R_{н}$ , Ом	$P_{н}$ , Вт	$f_{н}$ , Гц	$f_{в}$ , кГц	РЕЖИМ РАБОТЫ
1-1	5	10	4	10	0	9	АВ
1-2	6	11	8	16	0	10	АВ
1-3	7	12	16	3,7	0	11	АВ
1-4	8	13	4	18	0	12	АВ
1-5	9	14	8	10	0	13	АВ
1-6	10	15	16	6	0	14	АВ
1-7	11	16	4	28	0	15	АВ
1-8	12	17	8	5,6	0	16	АВ
1-9	13	18	16	0,8	0	17	АВ
1-10	14	19	4	18	0	18	АВ
1-11	15	20	8	9	0	19	АВ
1-12	16	21	16	5,2	0	20	АВ
1-13	17	22	4	10,1	0	21	АВ
1-14	18	23	8	6,25	0	22	АВ
1-15	19	24	16	3,7	0	23	АВ
1-16	20	25	4	18	0	24	АВ
1-17	21	26	8	10,5	0	25	АВ
1-18	22	27	16	2,5	0	26	АВ
1-19	23	28	4	12,5	0	27	АВ
1-20	24	29	8	7,5	0	28	АВ
1-21	25	30	16	4,5	0	29	АВ
1-22	26	31	4	21	0	30	АВ
1-23	27	32	8	5	0	31	АВ
1-24	28	33	16	6	0	32	АВ
1-25	29	34	4	3,1	0	33	АВ
1-26	30	35	8	9	0	34	АВ

1-27	31	36	16	5,2	0	35	АВ
1-28	32	37	4	10,1	0	36	АВ
1-29	33	38	8	6,2	0	37	АВ
1-30	34	39	16	3,7	0	38	АВ

Продолжение табл. 5.2.2

ВАРИАНТ	$K_{УОС}$	$R_{ВХ}, КОМ$	$R_{Н}, Ом$	$P_{Н}, Вт$	$f_{Н}, Гц$	$f_{В}, кГц$	РЕЖИМ РАБОТЫ
2-1	15	10	4	10	0	19	АВ
2-2	16	11	8	16	0	20	АВ
2-3	17	12	16	3,7	0	21	АВ
2-4	18	13	4	18	0	22	АВ
2-5	19	14	8	10	0	23	АВ
2-6	10	15	16	6	0	24	АВ
2-7	11	16	4	28	0	25	АВ
2-8	12	17	8	5,6	0	26	АВ
2-9	13	18	16	0,8	0	27	АВ
2-10	14	19	4	18	0	28	АВ
2-11	5	20	8	9	0	29	АВ
2-12	6	21	16	5,2	0	30	АВ
2-13	7	22	4	10,1	0	31	АВ
2-14	8	23	8	6,25	0	32	АВ
2-15	9	24	16	3,7	0	33	АВ
2-16	10	25	4	18	0	34	АВ
2-17	11	26	8	10,5	0	35	АВ
2-18	12	27	16	2,5	0	36	АВ
2-19	13	28	4	12,5	0	37	АВ
2-20	14	29	8	7,5	0	38	АВ
2-21	25	130	16	4,5	0	39	АВ
2-22	26	140	4	21	0	10	АВ
2-23	27	150	8	5	0	11	АВ
2-24	28	160	16	6	0	22	АВ
2-25	29	170	4	3,1	0	13	АВ
2-26	30	180	8	9	0	14	АВ
2-27	31	190	16	5,2	0	15	АВ
2-28	32	200	4	10,1	0	16	АВ
2-29	33	210	8	6,2	0	17	АВ
2-30	34	220	16	3,7	0	18	АВ

Продолжение табл. 5.2.2

ВАРИАНТ	$K_{УОС}$	$R_{ВХ}, КОМ$	$R_{Н}, Ом$	$P_{Н}, Вт$	$f_{Н}, Гц$	$f_{В}, кГц$	РЕЖИМ РАБОТЫ
3-1	25	100	4	10	100	9	АВ
3-2	26	110	8	16	90	10	АВ
3-3	27	120	16	3,7	80	11	АВ
3-4	28	130	4	18	70	12	АВ
3-5	29	140	8	10	60	13	АВ
3-6	30	150	16	6	50	14	АВ
3-7	31	160	4	28	40	15	АВ
3-8	32	170	8	5,6	30	16	АВ
3-9	33	180	16	0,8	20	17	АВ
3-10	34	190	4	18	10	8	АВ
3-11	35	200	8	9	110	29	АВ
3-12	36	25	16	5,2	120	30	АВ
3-13	37	30	4	10,1	130	31	АВ
3-14	38	35	8	6,25	140	32	АВ
3-15	39	40	16	3,7	150	33	АВ
3-16	10	45	4	18	160	34	АВ
3-17	11	50	8	10,5	170	35	АВ
3-18	12	55	16	2,5	180	36	АВ
3-19	13	60	4	12,5	190	37	АВ
3-20	14	65	8	7,5	200	38	АВ
3-21	15	70	16	4,5	210	39	АВ
3-22	16	75	4	21	220	200	АВ
3-23	17	80	8	5	230	21	АВ
3-24	18	85	16	6	240	22	АВ
3-25	19	90	4	3,1	250	23	АВ
3-26	20	95	8	9	260	24	АВ
3-27	21	100	16	5,2	270	25	АВ
3-28	22	110	4	10,1	280	26	АВ
3-29	23	120	8	6,2	290	27	АВ
3-30	24	130	16	3,7	300	28	АВ

**5.2.3. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ К ПРАКТИЧЕСКОМУ ЗАНЯТИЮ 5.  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА НИЖНИХ  
ЧАСТОТ ПЕРВОГО ПОРЯДКА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ  
РС-ЦЕПОЧКИ, ВКЛЮЧЕННОЙ НА ВХОДЕ ОУ**

Исходные данные (вариант 00):

верхняя частота среза  $f_{вФНЧ} = 16 \cdot 10^3$  Гц;

входное сопротивление  $R_{вхФНЧ} \geq 10$  кОм;

сопротивление нагрузки ФНЧ  $R_{нФНЧ} \geq 10$  кОм;

максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ФНЧ  $U_m = 10$ В;

коэффициент усиления по напряжению  $K_{уФНЧ} = 10$ .

Таблица 5.2.3

ВАРИАНТ	$R_{вхФНЧ}$ , КОМ	$R_{нФНЧ}$ , КОМ	$f_{вФНЧ}$ , КГц	$U_m$ , В	$K_{уФНЧ}$
1-1	10	4	9	15	5
1-2	15	5	10	14	6
1-3	20	6	11	13	7
1-4	25	7	12	12	8
1-5	30	8	13	11	9
1-6	35	9	14	10	10
1-7	40	10	15	9	11
1-8	45	11	16	9,5	12
1-9	50	12	17	10,5	13
1-10	55	13	18	11,5	14
1-11	60	14	19	12,5	15
1-12	65	15	20	13,5	5
1-13	70	16	21	14,5	6
1-14	75	17	22	9	7
1-15	80	18	23	10	8
1-16	85	19	24	11	9
1-17	90	20	25	12	10
1-18	95	21	26	13	11
1-19	100	22	27	14	12
1-20	105	23	28	15	13
1-21	110	24	29	9	14
1-22	120	25	30	10	15
1-23	130	26	31	11	5
1-24	140	27	32	12	6
1-25	150	28	33	13	7
1-25	160	29	34	14	8
1-27	170	30	35	15	9

1-28	180	31	36	9,5	10
1-29	190	32	37	10,5	11
1-30	200	33	38	11,5	12

Продолжение табл. 5.2.3

ВАРИАНТ	$R_{\text{ВХФНЧ, КОМ}}$	$R_{\text{НФНЧ, КОМ}}$	$f_{\text{ВФНЧ, КГц}}$	$U_{\text{М, В}}$	$K_{\text{УФНЧ}}$
2-1	100	4	9	15	5
2-2	150	5	10	14	6
2-3	200	6	11	13	7
2-4	250	7	12	12	8
2-5	300	8	13	11	9
2-6	35	9	24	15	13
2-7	40	10	15	9	17
2-8	45	11	16	9,5	18
2-9	50	12	17	10,5	15
2-10	55	13	18	11,5	10
2-11	60	14	19	12,5	10
2-12	65	15	10	13,5	15
2-13	70	16	11	14,5	16
2-14	75	17	12	9	17
2-15	80	18	13	10	18
2-16	85	19	14	11	19
2-17	90	20	15	12	20
2-18	95	21	16	13	21
2-19	100	22	17	14	22
2-20	105	23	18	15	23
2-21	110	24	19	9	24
2-22	120	25	20	10	25
2-23	130	26	21	11	15
2-24	140	27	22	12	16
2-25	150	28	23	13	17
2-25	160	29	24	14	18
2-27	170	30	25	15	19
2-28	180	31	26	9,5	10
2-29	190	32	27	10,5	21
2-30	200	33	28	11,5	12

Продолжение табл. 5.2.3

ВАРИАНТ	$R_{\text{ВХФНЧ, КОМ}}$	$R_{\text{НФНЧ, КОМ}}$	$f_{\text{ВФНЧ, КГц}}$	$U_{\text{М, В}}$	$K_{\text{УФНЧ}}$
3-1	100	4	9,5	15	15
3-2	110	5	10,5	14	16
3-3	120	6	11,5	13	17
3-4	130	7	12,5	12	18
3-5	140	8	13,5	11	19
3-6	150	9	14,5	10	10
3-7	160	10	15,5	9	1
3-8	170	11	16,5	9,5	2
3-9	180	12	17,5	10,5	3
3-10	190	13	18,5	11,5	4
3-11	200	14	19,5	12,5	5
3-12	165	15	20,5	13,5	15
3-13	170	16	21,5	14,5	16
3-14	175	17	22,5	9	17
3-15	180	18	23,5	10	18
3-16	185	19	24,5	11	19
3-17	190	20	25,5	12	20
3-18	195	21	26,5	13	21
3-19	10	22	27,5	14	22
3-20	15	23	28,5	15	23
3-21	20	24	29,5	9	24
3-22	25	25	30,5	10	25
3-23	30	26	31,5	11	5
3-24	40	27	32,5	12	6
3-25	50	28	33,5	13	7
3-25	60	29	34,5	14	8
3-27	70	30	35,5	15	9
3-28	80	31	36,5	9,5	10
3-29	90	32	37,5	10,5	11
3-30	100	33	38,5	11,5	12

**5.2.4. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ К ПРАКТИЧЕСКОМУ ЗАНЯТИЮ 6.  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА НИЖНИХ  
ЧАСТОТ ПЕРВОГО ПОРЯДКА НА БАЗЕ ОУ, ВКЛЮЧЕННОГО  
ПО СХЕМЕ ИНТЕГРАТОРА**

Исходные данные (вариант 00):

верхняя частота  $f_{вФНЧ} = 16 \cdot 10^3$  Гц;

входное сопротивление  $R_{вхФНЧ} \geq 10$  кОм;

сопротивление нагрузки ФНЧ  $R_{нФНЧ} \geq 10$  кОм;

максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ФНЧ  $U_m = 10$ В;

коэффициент усиления по напряжению  $K_{уФНЧ} = 10$ .

Таблица 5.2.4

ВАРИАНТ	$R_{вхФНЧ}$ , кОм	$R_{нФНЧ}$ , кОм	$f_{вФНЧ}$ , кГц	$U_m$ , В	$K_{уФНЧ}$
1-1	10	4	9	15	5
1-2	15	5	10	14	6
1-3	20	6	11	13	7
1-4	25	7	12	12	8
1-5	30	8	13	11	9
1-6	35	9	14	10	10
1-7	40	10	15	9	11
1-8	45	11	16	9,5	12
1-9	50	12	17	10,5	13
1-10	55	13	18	11,5	14
1-11	60	14	19	12,5	15
1-12	65	15	20	13,5	5
1-13	70	16	21	14,5	6
1-14	75	17	22	9	7
1-15	80	18	23	10	8
1-16	85	19	24	11	9
1-17	90	20	25	12	10
1-18	95	21	26	13	11
1-19	100	22	27	14	12
1-20	105	23	28	15	13
1-21	110	24	29	9	14
1-22	120	25	30	10	15
1-23	130	26	31	11	5
1-24	140	27	32	12	6
1-25	150	28	33	13	7

1-25	160	29	34	14	8
1-27	170	30	35	15	9
1-28	180	31	36	9,5	10
1-29	190	32	37	10,5	11
1-30	200	33	38	11,5	12

Продолжение табл. 5.2.4

ВАРИАНТ	$R_{\text{ВХФНЧ, КОМ}}$	$R_{\text{НФНЧ, КОМ}}$	$f_{\text{ВФНЧ, КГц}}$	$U_{\text{М, В}}$	$K_{\text{УФНЧ}}$
2-1	100	4	9	15	5
2-2	150	5	10	14	6
2-3	200	6	11	13	7
2-4	250	7	12	12	8
2-5	300	8	13	11	9
2-6	35	9	24	15	13
2-7	40	10	15	9	17
2-8	45	11	16	9,5	18
2-9	50	12	17	10,5	15
2-10	55	13	18	11,5	10
2-11	60	14	19	12,5	10
2-12	65	15	10	13,5	15
2-13	70	16	11	14,5	16
2-14	75	17	12	9	17
2-15	80	18	13	10	18
2-16	85	19	14	11	19
2-17	90	20	15	12	20
2-18	95	21	16	13	21
2-19	100	22	17	14	22
2-20	105	23	18	15	23
2-21	110	24	19	9	24
2-22	120	25	20	10	25
2-23	130	26	21	11	15
2-24	140	27	22	12	16
2-25	150	28	23	13	17
2-25	160	29	24	14	18
2-27	170	30	25	15	19
2-28	180	31	26	9,5	10
2-29	190	32	27	10,5	21
2-30	200	33	28	11,5	12

Продолжение табл. 5.2.4

ВАРИАНТ	$R_{\text{ВХФНЧ, КОМ}}$	$R_{\text{НФНЧ, КОМ}}$	$f_{\text{ВФНЧ, КГц}}$	$U_{\text{М, В}}$	$K_{\text{УФНЧ}}$
3-1	100	4	9,5	15	15
3-2	110	5	10,5	14	16
3-3	120	6	11,5	13	17
3-4	130	7	12,5	12	18
3-5	140	8	13,5	11	19
3-6	150	9	14,5	10	10
3-7	160	10	15,5	9	1
3-8	170	11	16,5	9,5	2
3-9	180	12	17,5	10,5	3
3-10	190	13	18,5	11,5	4
3-11	200	14	19,5	12,5	5
3-12	165	15	20,5	13,5	15
3-13	170	16	21,5	14,5	16
3-14	175	17	22,5	9	17
3-15	180	18	23,5	10	18
3-16	185	19	24,5	11	19
3-17	190	20	25,5	12	20
3-18	195	21	26,5	13	21
3-19	10	22	27,5	14	22
3-20	15	23	28,5	15	23
3-21	20	24	29,5	9	24
3-22	25	25	30,5	10	25
3-23	30	26	31,5	11	5
3-24	40	27	32,5	12	6
3-25	50	28	33,5	13	7
3-25	60	29	34,5	14	8
3-27	70	30	35,5	15	9
3-28	80	31	36,5	9,5	10
3-29	90	32	37,5	10,5	11
3-30	100	33	38,5	11,5	12

**5.2.5. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ К ПРАКТИЧЕСКОМУ ЗАНЯТИЮ 7.  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ВЕРХНИХ  
ЧАСТОТ ПЕРВОГО ПОРЯДКА НА ОСНОВЕ  
ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩЕЙ ЦЕПОЧКИ, ВКЛЮЧЕННОЙ НА ВХОДЕ  
ОУ**

Исходные данные (вариант 00):

верхняя частота  $f_{вФНЧ} = 16 \cdot 10^3$  Гц;

входное сопротивление  $R_{вхФНЧ} \geq 10$  кОм;

сопротивление нагрузки ФНЧ  $R_{нФНЧ} \geq 10$  кОм;

максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ФНЧ  $U_m = 10$ В;

коэффициент усиления по напряжению  $K_{уФНЧ} = 10$ .

Таблица 5.2.5

ВАРИАНТ	$R_{вхФВЧ}$ , КОМ	$R_{нФВЧ}$ , КОМ	$f_{срФВЧ}/f_{в}$ , КГц	$U_m$ , В	$K_{уФВЧ}$
1-1	10	4	0,10/9	15	5
1-2	15	5	0,11/10	14	6
1-3	20	6	0,12/11	13	7
1-4	25	7	0,13/12	12	8
1-5	30	8	0,14/13	11	9
1-6	35	9	0,15/14	10	10
1-7	40	10	0,16/15	9	11
1-8	45	11	0,17/16	9,5	12
1-9	50	12	0,18/17	10,5	13
1-10	55	13	0,19/18	11,5	14
1-11	60	14	0,20/19	12,5	15
1-12	65	15	0,21/20	13,5	5
1-13	70	16	0,22/21	14,5	6
1-14	75	17	0,23/22	9	7
1-15	80	18	0,24/23	10	8
1-16	85	19	0,25/24	11	9
1-17	90	20	0,26/25	12	10
1-18	95	21	0,27/26	13	11
1-19	100	22	0,28/27	14	12
1-20	105	23	0,29/28	15	13
1-21	110	24	0,30/29	9	14
1-22	120	25	0,31/30	10	15
1-23	130	26	0,32/31	11	5

1-24	140	27	0,33/32	12	6
1-25	150	28	0,34/33	13	7
1-25	160	29	0,35/34	14	8
1-27	170	30	0,36/35	15	9
1-28	180	31	0,37/36	9,5	10
1-29	190	32	0,38/37	10,5	11
1-30	200	33	0,39/38	11,5	12

Продолжение табл. 5.2.5

ВАРИАНТ	$R_{\text{ВХФВЧ, КОМ}}$	$R_{\text{НФВЧ, КОМ}}$	$f_{\text{СРФВЧ}}/f_{\text{В, КГц}}$	$U_{\text{М, В}}$	$K_{\text{УФВЧ}}$
2-1	100	4	0,20/9	15	5
2-2	150	5	0,21/10	14	6
2-3	200	6	0,22/11	13	7
2-4	250	7	0,23/12	12	8
2-5	300	8	0,24/13	11	9
2-6	35	9	0,25/24	15	13
2-7	40	10	0,26/15	9	17
2-8	45	11	0,27/16	9,5	18
2-9	50	12	0,28/17	10,5	15
2-10	55	13	0,29/18	11,5	10
2-11	60	14	0,31/19	12,5	10
2-12	65	15	0,32/10	13,5	15
2-13	70	16	0,33/11	14,5	16
2-14	75	17	0,34/12	9	17
2-15	80	18	0,35/13	10	18
2-16	85	19	0,36/14	11	19
2-17	90	20	0,37/15	12	20
2-18	95	21	0,38/16	13	21
2-19	100	22	0,39/17	14	22
2-20	105	23	0,10/18	15	23
2-21	110	24	0,11/19	9	24
2-22	120	25	0,12/20	10	25
2-23	130	26	0,13/21	11	15
2-24	140	27	0,14/22	12	16
2-25	150	28	0,15/23	13	17
2-25	160	29	0,16/24	14	18
2-27	170	30	0,17/25	15	19
2-28	180	31	0,18/26	9,5	10
2-29	190	32	0,19/27	10,5	21
2-30	200	33	0,20/28	11,5	12

Продолжение табл. 5.2.5

ВАРИАНТ	$R_{\text{ВХФВЧ, КОМ}}$	$R_{\text{НФВЧ, КОМ}}$	$f_{\text{СРФВЧ}}/f_{\text{В, КГц}}$	$U_{\text{М, В}}$	$K_{\text{УФВЧ}}$
3-1	100	4	0,30/9,5	15	15
3-2	110	5	0,31/10,5	14	16
3-3	120	6	0,32/11,5	13	17
3-4	130	7	0,33/12,5	12	18
3-5	140	8	0,34/13,5	11	19
3-6	150	9	0,35/14,5	10	10
3-7	160	10	0,36/15,5	9	1
3-8	170	11	0,37/16,5	9,5	2
3-9	180	12	0,38/17,5	10,5	3
3-10	190	13	0,39/18,5	11,5	4
3-11	200	14	0,10/19,5	12,5	5
3-12	165	15	0,11/20,5	13,5	15
3-13	170	16	0,12/21,5	14,5	16
3-14	175	17	0,13/22,5	9	17
3-15	180	18	0,14/23,5	10	18
3-16	185	19	0,15/24,5	11	19
3-17	190	20	0,16/25,5	12	20
3-18	195	21	0,17/26,5	13	21
3-19	10	22	0,18/27,5	14	22
3-20	15	23	0,19/28,5	15	23
3-21	20	24	0,20/29,5	9	24
3-22	25	25	0,21/30,5	10	25
3-23	30	26	0,22/31,5	11	5
3-24	40	27	0,23/32,5	12	6
3-25	50	28	0,24/33,5	13	7
3-25	60	29	0,25/34,5	14	8
3-27	70	30	0,26/35,5	15	9
3-28	80	31	0,27/36,5	9,5	10
3-29	90	32	0,29/37,5	10,5	11
3-30	100	33	0,30/38,5	11,5	12

**5.2.6. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ К ПРАКТИЧЕСКОМУ ЗАНЯТИЮ 8.  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ВЕРХНИХ  
ЧАСТОТ ПЕРВОГО ПОРЯДКА НА БАЗЕ ОУ, ВКЛЮЧЕННОГО ПО  
СХЕМЕ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ**

Исходные данные (вариант 00):

частота среза ФВЧ  $f_{\text{ср ФВЧ}} = 130$  Гц;

верхняя частота среза разрабатываемого устройства  $f_{\text{в}} = 16 \cdot 10^3$  Гц;

входное сопротивление  $R_{\text{вхФВЧ}} \geq 10$  кОм;

сопротивление нагрузки ФВЧ  $R_{\text{н ФВЧ}} \geq 10$  кОм;

максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ФВЧ  $U_{\text{м}} = 10$ В;

коэффициент усиления по напряжению ФВЧ  $K_{\text{иФНЧ}} = 10$ .

Таблица 5.2.6

ВАРИАНТ	$R_{\text{вхФВЧ}}$ , КОМ	$R_{\text{н ФВЧ}}$ , КОМ	$f_{\text{срФВЧ}}/f_{\text{в}}$ , кГц	$U_{\text{м}}$ , В	$K_{\text{иФВЧ}}$
1-1	10	4	0,10/9	15	5
1-2	15	5	0,11/10	14	6
1-3	20	6	0,12/11	13	7
1-4	25	7	0,13/12	12	8
1-5	30	8	0,14/13	11	9
1-6	35	9	0,15/14	10	10
1-7	40	10	0,16/15	9	11
1-8	45	11	0,17/16	9,5	12
1-9	50	12	0,18/17	10,5	13
1-10	55	13	0,19/18	11,5	14
1-11	60	14	0,20/19	12,5	15
1-12	65	15	0,21/20	13,5	5
1-13	70	16	0,22/21	14,5	6
1-14	75	17	0,23/22	9	7
1-15	80	18	0,24/23	10	8
1-16	85	19	0,25/24	11	9
1-17	90	20	0,26/25	12	10
1-18	95	21	0,27/26	13	11
1-19	100	22	0,28/27	14	12
1-20	105	23	0,29/28	15	13
1-21	110	24	0,30/29	9	14
1-22	120	25	0,31/30	10	15

1-23	130	26	0,32/31	11	5
1-24	140	27	0,33/32	12	6
1-25	150	28	0,34/33	13	7
1-25	160	29	0,35/34	14	8
1-27	170	30	0,36/35	15	9
1-28	180	31	0,37/36	9,5	10
1-29	190	32	0,38/37	10,5	11
1-30	200	33	0,39/38	11,5	12

Продолжение табл. 5.2.6

ВАРИАНТ	$R_{\text{ВХФНЧ}}$ , КОМ	$R_{\text{НФНЧ}}$ , КОМ	$f_{\text{СРФВЧ}}/f_{\text{В}}$ , КГц	$U_{\text{М}}$ , В	$K_{\text{УФНЧ}}$
2-1	100	4	0,20/9	15	5
2-2	150	5	0,21/10	14	6
2-3	200	6	0,22/11	13	7
2-4	250	7	0,23/12	12	8
2-5	300	8	0,24/13	11	9
2-6	35	9	0,25/24	15	13
2-7	40	10	0,26/15	9	17
2-8	45	11	0,27/16	9,5	18
2-9	50	12	0,28/17	10,5	15
2-10	55	13	0,29/18	11,5	10
2-11	60	14	0,31/19	12,5	10
2-12	65	15	0,32/10	13,5	15
2-13	70	16	0,33/11	14,5	16
2-14	75	17	0,34/12	9	17
2-15	80	18	0,35/13	10	18
2-16	85	19	0,36/14	11	19
2-17	90	20	0,37/15	12	20
2-18	95	21	0,38/16	13	21
2-19	100	22	0,39/17	14	22
2-20	105	23	0,10/18	15	23
2-21	110	24	0,11/19	9	24
2-22	120	25	0,12/20	10	25
2-23	130	26	0,13/21	11	15
2-24	140	27	0,14/22	12	16
2-25	150	28	0,15/23	13	17
2-25	160	29	0,16/24	14	18
2-27	170	30	0,17/25	15	19
2-28	180	31	0,18/26	9,5	10
2-29	190	32	0,19/27	10,5	21
2-30	200	33	0,20/28	11,5	12

Продолжение табл. 5.2.6

ВАРИАНТ	$R_{\text{ВХФНЧ, КОМ}}$	$R_{\text{НФНЧ, КОМ}}$	$f_{\text{СРФВЧ}}/f_{\text{В, КГц}}$	$U_{\text{М, В}}$	$K_{\text{УФНЧ}}$
3-1	100	4	0,30/9,5	15	15
3-2	110	5	0,31/10,5	14	16
3-3	120	6	0,32/11,5	13	17
3-4	130	7	0,33/12,5	12	18
3-5	140	8	0,34/13,5	11	19
3-6	150	9	0,35/14,5	10	10
3-7	160	10	0,36/15,5	9	1
3-8	170	11	0,37/16,5	9,5	2
3-9	180	12	0,38/17,5	10,5	3
3-10	190	13	0,39/18,5	11,5	4
3-11	200	14	0,10/19,5	12,5	5
3-12	165	15	0,11/20,5	13,5	15
3-13	170	16	0,12/21,5	14,5	16
3-14	175	17	0,13/22,5	9	17
3-15	180	18	0,14/23,5	10	18
3-16	185	19	0,15/24,5	11	19
3-17	190	20	0,16/25,5	12	20
3-18	195	21	0,17/26,5	13	21
3-19	10	22	0,18/27,5	14	22
3-20	15	23	0,19/28,5	15	23
3-21	20	24	0,20/29,5	9	24
3-22	25	25	0,21/30,5	10	25
3-23	30	26	0,22/31,5	11	5
3-24	40	27	0,23/32,5	12	6
3-25	50	28	0,24/33,5	13	7
3-25	60	29	0,25/34,5	14	8
3-27	70	30	0,26/35,5	15	9
3-28	80	31	0,27/36,5	9,5	10
3-29	90	32	0,29/37,5	10,5	11
3-30	100	33	0,30/38,5	11,5	12

### 5.2.7. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ К ПРАКТИЧЕСКОМУ ЗАНЯТИЮ 9. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ АКТИВНОГО ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА ПЕРВОГО ПОРЯДКА НА ОСНОВЕ ОУ

Исходные данные (вариант 00):

нижняя частота среза разрабатываемого устройства  $f_{нПФ} = 1050$  Гц;

верхняя частота среза разрабатываемого устройства  $f_{вПФ} = 16 \cdot 10^3$  Гц;

входное сопротивление  $R_{вхПФ} \geq 10$  кОм;

сопротивление нагрузки ПФ  $R_{нПФ} \geq 10$  кОм;

максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ПФ  $U_m = 10$  В.

коэффициент усиления по напряжению ПФ  $K_{уПФ} = 10$ .

Таблица 5.2.7

ВАРИАНТ	$R_{вхПФ}$ , КОМ	$R_{нПФ}$ , КОМ	$f_{нПФ}/f_{вПФ}$ , кГц	$U_m$ , В	$K_{уПФ}$
1-1	10	4	0,10/9	15	5
1-2	15	5	0,11/10	14	6
1-3	20	6	0,12/11	13	7
1-4	25	7	0,13/12	12	8
1-5	30	8	0,14/13	11	9
1-6	35	9	0,15/14	10	10
1-7	40	10	0,16/15	9	11
1-8	45	11	0,17/16	9,5	12
1-9	50	12	0,18/17	10,5	13
1-10	55	13	0,19/18	11,5	14
1-11	60	14	0,20/19	12,5	15
1-12	65	15	0,21/20	13,5	5
1-13	70	16	0,22/21	14,5	6
1-14	75	17	0,23/22	9	7
1-15	80	18	0,24/23	10	8
1-16	85	19	0,25/24	11	9
1-17	90	20	0,26/25	12	10
1-18	95	21	0,27/26	13	11
1-19	100	22	0,28/27	14	12
1-20	105	23	0,29/28	15	13
1-21	110	24	0,30/29	9	14
1-22	120	25	0,31/30	10	15

1-23	130	26	0,32/31	11	5
1-24	140	27	0,33/32	12	6
1-25	150	28	0,34/33	13	7
1-25	160	29	0,35/34	14	8
1-27	170	30	0,36/35	15	9
1-28	180	31	0,37/36	9,5	10
1-29	190	32	0,38/37	10,5	11
1-30	200	33	0,39/38	11,5	12

Продолжение табл. 5.2.7

ВАРИАНТ	$R_{\text{вхПФ, КОМ}}$	$R_{\text{нПФ, КОМ}}$	$f_{\text{нПФ}}/f_{\text{вПФ}}$ , кГц	$U_{\text{м}}$ , В	$K_{\text{упФ}}$
2-1	100	4	0,20/9	15	5
2-2	150	5	0,21/10	14	6
2-3	200	6	0,22/11	13	7
2-4	250	7	0,23/12	12	8
2-5	300	8	0,24/13	11	9
2-6	35	9	0,25/24	15	13
2-7	40	10	0,26/15	9	17
2-8	45	11	0,27/16	9,5	18
2-9	50	12	0,28/17	10,5	15
2-10	55	13	0,29/18	11,5	10
2-11	60	14	0,31/19	12,5	10
2-12	65	15	0,32/10	13,5	15
2-13	70	16	0,33/11	14,5	16
2-14	75	17	0,34/12	9	17
2-15	80	18	0,35/13	10	18
2-16	85	19	0,36/14	11	19
2-17	90	20	0,37/15	12	20
2-18	95	21	0,38/16	13	21
2-19	100	22	0,39/17	14	22
2-20	105	23	0,10/18	15	23
2-21	110	24	0,11/19	9	24
2-22	120	25	0,12/20	10	25
2-23	130	26	0,13/21	11	15
2-24	140	27	0,14/22	12	16
2-25	150	28	0,15/23	13	17
2-25	160	29	0,16/24	14	18
2-27	170	30	0,17/25	15	19
2-28	180	31	0,18/26	9,5	10
2-29	190	32	0,19/27	10,5	21
2-30	200	33	0,20/28	11,5	12

Продолжение табл. 5.2.7

ВАРИАНТ	$R_{\text{вхПФ}}, \text{КОМ}$	$R_{\text{нПФ}}, \text{КОМ}$	$f_{\text{нПФ}}/f_{\text{вПФ}},$ кГц	$U_{\text{м}}, \text{В}$	$K_{\text{упФ}}$
3-1	100	4	0,30/9,5	15	15
3-2	110	5	0,31/10,5	14	16
3-3	120	6	0,32/11,5	13	17
3-4	130	7	0,33/12,5	12	18
3-5	140	8	0,34/13,5	11	19
3-6	150	9	0,35/14,5	10	10
3-7	160	10	0,36/15,5	9	1
3-8	170	11	0,37/16,5	9,5	2
3-9	180	12	0,38/17,5	10,5	3
3-10	190	13	0,39/18,5	11,5	4
3-11	200	14	0,10/19,5	12,5	5
3-12	165	15	0,11/20,5	13,5	15
3-13	170	16	0,12/21,5	14,5	16
3-14	175	17	0,13/22,5	9	17
3-15	180	18	0,14/23,5	10	18
3-16	185	19	0,15/24,5	11	19
3-17	190	20	0,16/25,5	12	20
3-18	195	21	0,17/26,5	13	21
3-19	10	22	0,18/27,5	14	22
3-20	15	23	0,19/28,5	15	23
3-21	20	24	0,20/29,5	9	24
3-22	25	25	0,21/30,5	10	25
3-23	30	26	0,22/31,5	11	5
3-24	40	27	0,23/32,5	12	6
3-25	50	28	0,24/33,5	13	7
3-25	60	29	0,25/34,5	14	8
3-27	70	30	0,26/35,5	15	9
3-28	80	31	0,27/36,5	9,5	10
3-29	90	32	0,29/37,5	10,5	11
3-30	100	33	0,30/38,5	11,5	12

### 5.2.8. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ К ПРАКТИЧЕСКОМУ ЗАНЯТИЮ 10. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВХОДНОГО КАСКАДА НА БАЗЕ НЕИНВЕРТИРУЮЩЕГО ВКЛЮЧЕНИЯ ОУ

Исходные данные (вариант 00):

входное сопротивление  $R_{вх} \geq 25$  кОм;

коэффициент усиления по напряжению  $K_{уос} = 10$ ;

сопротивление нагрузки  $R_{н} \geq 10$  кОм;

нижняя частота полосы пропускания УНЧ  $f_{н} = 0$  Гц;

верхняя частота полосы пропускания УНЧ  $f_{в} = 16$  КГц;

максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ОУ  $U_{м} = 9$  В.

Таблица 5.2.8

ВАРИАНТ	$R_{вх}, \text{КОМ}$	$R_{н}, \text{КОМ}$	$f_{н}/f_{в}, \text{КГЦ}$	$U_{м}, \text{В}$	$K_{уос}$
1-1	100	4	0/9	15	5
1-2	150	5	0/10	14	6
1-3	120	6	0/11	13	7
1-4	250	7	0/12	12	8
1-5	300	8	0/13	11	9
1-6	350	9	0/14	10	10
1-7	400	10	0/15	9	11
1-8	450	11	0/16	9,5	12
1-9	500	12	0/17	10,5	13
1-10	550	13	0/18	11,5	14
1-11	600	14	0/19	12,5	15
1-12	650	15	0/20	13,5	5
1-13	700	16	0/21	14,5	6
1-14	175	17	0/22	9	7
1-15	180	18	0/23	10	8
1-16	185	19	0/24	11	9
1-17	190	20	0/25	12	10
1-18	195	21	0/26	13	11
1-19	100	22	0/27	14	12
1-20	105	23	0/28	15	13

1-21	110	24	0/29	9	14
1-22	120	25	0/30	10	15
1-23	130	26	0/31	11	5
1-24	140	27	0/32	12	6
1-25	150	28	0/33	13	7
1-25	160	29	0/34	14	8
1-27	170	30	0/35	15	9
1-28	180	31	0/36	9,5	10
1-29	190	32	0/37	10,5	11
1-30	200	33	0/38	11,5	12

Продолжение табл. 5.2.8

ВАРИАНТ	$R_{BX}, \text{КОМ}$	$R_H, \text{КОМ}$	$f_H/f_B, \text{КГц}$	$U_M, \text{В}$	$K_{UOC}$
2-1	100	4	0/9	15	5
2-2	150	5	0/10	14	6
2-3	200	6	0/11	13	7
2-4	250	7	0/12	12	8
2-5	300	8	0/13	11	9
2-6	350	9	0/24	15	13
2-7	400	10	0/15	9	17
2-8	450	11	0/16	9,5	18
2-9	500	12	0/17	10,5	15
2-10	550	13	0/18	11,5	10
2-11	600	14	0/19	12,5	10
2-12	650	15	0/10	13,5	15
2-13	700	16	0/11	14,5	16
2-14	750	17	0/12	9	17
2-15	800	18	0/13	10	18
2-16	185	19	0/14	11	19
2-17	190	20	0/15	12	20
2-18	195	21	0/16	13	21
2-19	100	22	0/17	14	22
2-20	105	23	0/18	15	23
2-21	110	24	0/19	9	24
2-22	120	25	0/20	10	25
2-23	130	26	0/21	11	15
2-24	140	27	0/22	12	16
2-25	150	28	0/23	13	17
2-25	160	29	0/24	14	18
2-27	170	30	0/25	15	19
2-28	180	31	0/26	9,5	10
2-29	190	32	0/27	10,5	21
2-30	200	33	0/28	11,5	12

Продолжение табл. 5.2.8

ВАРИАНТ	$R_{BX}$ , КОМ	$R_H$ , КОМ	$f_H/f_B$ , КГц	$U_M$ , В	$K_{UOC}$
3-1	100	4	0/9,5	15	15
3-2	110	5	0/10,5	14	16
3-3	120	6	0/11,5	13	17
3-4	130	7	0/12,5	12	18
3-5	140	8	0/13,5	11	19
3-6	150	9	0/14,5	10	10
3-7	160	10	0/15,5	9	1
3-8	170	11	0/16,5	9,5	2
3-9	180	12	0/17,5	10,5	3
3-10	190	13	0/18,5	11,5	4
3-11	200	14	0/19,5	12,5	5
3-12	165	15	0/20,5	13,5	15
3-13	170	16	0/21,5	14,5	16
3-14	175	17	0/22,5	9	17
3-15	180	18	0/23,5	10	18
3-16	185	19	0/24,5	11	19
3-17	190	20	0/25,5	12	20
3-18	195	21	0/26,5	13	21
3-19	100	22	0/27,5	14	22
3-20	150	23	0/28,5	15	23
3-21	200	24	0/29,5	9	24
3-22	250	25	0/30,5	10	25
3-23	300	26	0/31,5	11	5
3-24	400	27	0/32,5	12	6
3-25	500	28	0/33,5	13	7
3-25	160	29	0/34,5	14	8
3-27	170	30	0/35,5	15	9
3-28	180	31	0/36,5	9,5	10
3-29	190	32	0/37,5	10,5	11
3-30	100	33	0/38,5	11,5	12

### 5.2.9. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ К ПРАКТИЧЕСКОМУ ЗАНЯТИЮ 11. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВХОДНОГО КАСКАДА НА БАЗЕ ИНВЕРТИРУЮЩЕГО ВКЛЮЧЕНИЯ ОУ

Исходные данные (вариант 00):

входное сопротивление  $R_{вх} \geq 25$  кОм;

коэффициент усиления по напряжению  $K_{уос} = 10$ ;

сопротивление нагрузки  $R_{н} \geq 10$  кОм;

нижняя частота полосы пропускания УНЧ  $f_{н} = 0$  Гц;

верхняя частота полосы пропускания УНЧ  $f_{в} = 16$  КГц;

максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ОУ  $U_m = 9$  В.

Таблица 5.2.9

ВАРИАНТ	$R_{вх}, \text{КОМ}$	$R_{н}, \text{КОМ}$	$f_{н}/f_{в}, \text{КГц}$	$U_m, \text{В}$	$K_{уос}$
1-1	10	4	0/9	15	5
1-2	15	5	0/10	14	6
1-3	12	6	0/11	13	7
1-4	25	7	0/12	12	8
1-5	30	8	0/13	11	9
1-6	35	9	0/14	10	10
1-7	40	10	0/15	9	11
1-8	45	11	0/16	9,5	12
1-9	50	12	0/17	10,5	13
1-10	55	13	0/18	11,5	14
1-11	60	14	0/19	12,5	15
1-12	65	15	0/20	13,5	5
1-13	70	16	0/21	14,5	6
1-14	17	17	0/22	9	7
1-15	18	18	0/23	10	8
1-16	19	19	0/24	11	9
1-17	20	20	0/25	12	10
1-18	29	21	0/26	13	11
1-19	20	22	0/27	14	12
1-20	10	23	0/28	15	13

1-21	11	24	0/29	9	14
1-22	12	25	0/30	10	15
1-23	13	26	0/31	11	5
1-24	14	27	0/32	12	6
1-25	15	28	0/33	13	7
1-25	16	29	0/34	14	8
1-27	17	30	0/35	15	9
1-29	19	32	0/37	10,5	11
1-30	20	33	0/38	11,5	12

Продолжение табл. 5.2.9

ВАРИАНТ	$R_{BX}, \text{КОМ}$	$R_H, \text{КОМ}$	$f_H/f_B, \text{КГц}$	$U_M, \text{В}$	$K_{UOC}$
2-1	10	4	0/9	15	5
2-2	15	5	0/10	14	6
2-3	20	6	0/11	13	7
2-4	25	7	0/12	12	8
2-5	30	8	0/13	11	9
2-6	35	9	0/24	15	13
2-7	40	10	0/15	9	17
2-8	45	11	0/16	9,5	18
2-9	50	12	0/17	10,5	15
2-10	55	13	0/18	11,5	10
2-11	60	14	0/19	12,5	10
2-12	65	15	0/10	13,5	15
2-13	70	16	0/11	14,5	16
2-14	75	17	0/12	9	17
2-15	80	18	0/13	10	18
2-16	18	19	0/14	11	19
2-17	19	20	0/15	12	20
2-18	1	21	0/16	13	21
2-19	2	22	0/17	14	22
2-20	10	23	0/18	15	23
2-21	11	24	0/19	9	24
2-22	12	25	0/20	10	25
2-23	13	26	0/21	11	15
2-24	14	27	0/22	12	16
2-25	15	28	0/23	13	17
2-25	16	29	0/24	14	18
2-27	17	30	0/25	15	19
2-28	18	31	0/26	9,5	10
2-29	19	32	0/27	10,5	21
2-30	2	33	0/28	11,5	12

Продолжение табл. 5.2.9

ВАРИАНТ	$R_{BX}, \text{КОМ}$	$R_H, \text{КОМ}$	$f_H/f_B, \text{КГц}$	$U_M, \text{В}$	$K_{UOC}$
3-1	1	4	0/9,5	15	15
3-2	11	5	0/10,5	14	16
3-3	12	6	0/11,5	13	17
3-4	13	7	0/12,5	12	18
3-5	14	8	0/13,5	11	19
3-6	15	9	0/14,5	10	10
3-7	16	10	0/15,5	9	1
3-8	17	11	0/16,5	9,5	2
3-9	18	12	0/17,5	10,5	3
3-10	19	13	0/18,5	11,5	4
3-11	2	14	0/19,5	12,5	5
3-12	15	15	0/20,5	13,5	15
3-13	10	16	0/21,5	14,5	16
3-14	15	17	0/22,5	9	17
3-15	10	18	0/23,5	10	18
3-16	15	19	0/24,5	11	19
3-17	10	20	0/25,5	12	20
3-18	19	21	0/26,5	13	21
3-19	1	22	0/27,5	14	22
3-20	15	23	0/28,5	15	23
3-21	2	24	0/29,5	9	24
3-22	20	25	0/30,5	10	25
3-23	30	26	0/31,5	11	5
3-24	40	27	0/32,5	12	6
3-25	50	28	0/33,5	13	7
3-25	16	29	0/34,5	14	8
3-27	17	30	0/35,5	15	9
3-28	18	31	0/36,5	9,5	10
3-29	19	32	0/37,5	10,5	11
3-30	10	33	0/38,5	11,5	12

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В пособии даны теоретические сведения, в которых раскрываются наиболее актуальные вопросы теории и практики схемотехнического проектирования аналоговых электронных устройств, даны индивидуальные варианты по темам занятий с методическими рекомендациями и примерами выполнения, рекомендации по оформлению курсовой работы и примеры расчета основных её фрагментов. Разработка аналоговых электронных устройств рассматривается с позиций системного подхода; с учетом необходимости формализации процесса проектирования показаны стадии и этапы разработки и их взаимосвязь.

В пособии уделено большое внимание практическим аспектам схемотехники аналоговых электронных устройств: разработке схем электрической структурной, электрической функциональной, электрической принципиальной и примеров подробного электрического расчета усилительно-преобразовательных каскадов на операционных усилителях и окончного каскада усилителя мощности на биполярных транзисторах. Достаточно объемный иллюстративный материал, доступность изложения и наличие информации справочного характера позволяют использовать пособие для самостоятельной работы студентов направления подготовки 11.03.01 «РАДИОТЕХНИКА» очной формы обучения при изучении дисциплины «Схемотехника аналоговых электронных устройств».

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

### **Приложение 1**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВПО «ВГТУ», ВГТУ)**

---

**Факультет радиотехники и электроники**

**Кафедра радиотехники**

### **КУРСОВОЙ ПРОЕКТ**

**по дисциплине «Схемотехника аналоговых электронных  
устройств»**

**Тема: «Разработка усилителя мощности с заданной АЧХ»**

Выполнил:

студент группы РТ-151 ФРТЭ  
Иванов И.А

Руководитель:  
к.ф.-м.н, доцент  
Горбатенко В.В

Защищен \_\_\_\_\_

Оценка \_\_\_\_\_

Воронеж 2017

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2**

**ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ ТРАНЗИСТОРОВ И ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ**

Таблица П2.1

**ТРАНЗИСТОРЫ**

ТИП ПРИБОРА	ТИП ПРОВ.	$P_K$ доп, Вт	$U_{KЭ}$ доп, В	$I_K$ доп, А	$I_{KI}$ МАХ, А	h21Э	$U_{KЭ}$ НАС, В	$I_{SO}$ , МКА	$F_1$ , МГц
КТ503Б	N-P-N	0,35	40	0,15	-	80...240	0,2	1	5
КТ315А	N-P-N	0,15	25	0,1	-	20...90	0,4	1	250
КТ315В	N-P-N	0,15	40	0,1	-	20...90	0,4	1	250
КТ315Г	N-P-N	0,15	35	0,1	-	50...350	0,4	1	250
КТ502Б	P-N-P	0,35	40	0,15	-	80...240	0,2	1	5
КТ361А	P-N-P	0,15	25	0,05	-	20...90	0,4	1	250
КТ361В	P-N-P	0,15	40	0,05	-	40...160	0,4	1	250
КТ361Г	P-N-P	0,15	35	0,05	-	50...350	0,4	1	250
КТ3102А	N-P-N	0,25	50	0,1	0,2	100...250	0,5	0,05	100
КТ3102Б	N-P-N	0,25	50	0,1	0,2	200...500	0,5	0,05	100
КТ3102В	N-P-N	0,25	50	0,1	0,2	200...500	0,5	0,015	100
КТ3102Г	N-P-N	0,25	50	0,1	0,2	400...1000	0,5	0,015	100
КТ3107А	P-N-P	0,3	50	0,1	0,2	70...140	0,5	0,1	200
КТ3107Б	P-N-P	0,3	45	0,1	0,2	120...220	0,5	0,1	200
КТ3107И	P-N-P	0,3	45	0,1	0,2	180...460	0,5	0,1	200
КТ3107Б	P-N-P	0,3	25	0,1	0,2	380...800	0,5	0,1	200
КТ815А	N-P-N	10	25	1,5	3	40	0,6	50	3
КТ815Б	N-P-N	10	40	1,5	3	40	0,6	50	3
КТ815В	N-P-N	10	60	1,5	3	40	0,6	50	3
КТ815Г	N-P-N	10	80	1,5	3	30	0,6	50	3
КТ814А	P-N-P	10	25	1,5	3	40	0,6	50	3
КТ814Б	P-N-P	10	40	1,5	3	40	0,6	50	3
КТ814В	P-N-P	10	60	1,5	3	40	0,6	50	3
КТ814Г	P-N-P	10	80	1,5	3	30	0,6	50	3
КТ817А	N-P-N	25	25	3	5	25	0,6	100	3
КТ817Б	N-P-N	25	45	3	5	25	0,6	100	3
КТ817В	N-P-N	25	60	3	5	25	0,6	100	3

КТ817Г	N-P-N	25	80	3	5	25	0,6	100	3
КТ816А	P-N-P	25	25	3	5	25	0,6	100	3
КТ816Б	P-N-P	25	45	3	5	25	0,6	100	3
КТ816В	P-N-P	25	60	3	5	25	0,6	100	3
КТ816Г	P-N-P	25	80	3	5	25	0,6	100	3
КТ819А	N-P-N	60	25	10	15	15	2	1000	3
КТ819Б	N-P-N	60	40	10	15	20	2	1000	3
КТ819В	N-P-N	60	60	10	15	15	2	1000	3
КТ819Г	N-P-N	60	80	10	15	12	2	1000	3
КТ818А	P-N-P	60	25	10	15	15	2	1000	3
КТ818Б	P-N-P	60	40	10	15	20	2	1000	3
КТ818В	P-N-P	60	60	10	15	15	2	1000	3
КТ818Г	P-N-P	60	80	10	15	12	2	1000	3

Таблица П2.2

### ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ	U <sub>пит.</sub> , В	I <sub>по</sub> т, м А	K <sub>u</sub> , 10 <sup>3</sup>	U <sub>c</sub> м, МВ	I <sub>вх</sub> , нА	F <sub>1</sub> , МГц	V <sub>увых.м</sub> акс В/мкс	U <sub>вых.м</sub> акс, В	R <sub>н мин</sub> , кОм	R <sub>вх</sub> , МОм
К140УД6, К140УД608	5..20	3	30	8	50	1	2	12	1	1
К140УД7, К140УД708	5..20	2,8	30	9	400	0,8	0,3	10,5	2	0,4
К140УД7, К140УД7(А-В)	12.. 16	5	20.. 50	20.. 50	0,2	1	2	10	2	10
К140УД17, К140УД17(А-В)	3..18	5	120.. 200	0,1. . 0,2 5	4.. 12	0,4	0,1	12	2	30
К140УД18	6..18	4	25.. 50	10	0,2	2,5	5	11	2	10 <sup>6</sup>
К140УД20, К140УД20(А-В)	5..20	3	25.. 50	3..6	100	0,5	0,3	11	1	0,4
К153УД5	5..16	3,5	500.. 1000	1..2	100	0,2	0,01	10	2	1
К154УД1	4..18	3	100.. 200	5	40	1	10	11	2	1
К154УД3	5..18	7	8..10	10	200	15	80	10	2	1
К154УД4	5..17	7	8..10	6	1200	30	400	10	2	1
К157УД2	3..18	7	50	10	500	1	0,5	13	0,3	0,5
К551УД1(А-В)	5.. 16,5	5	500	1,5	120	0,8	0,1	12	2	1
К551УД2(А-В)	5.. 16,5	10	500	5	2000	1	0,25	12	2	0,5
К544УД1, КР544УД1(А-В)	3..20	3,5	50	20	0,1	1	3	10	2	10
К544УД2, КР544УД2(А-В)	8..20	7	20	50	0,5	15	20	10	2	10

К574УД2, КР574УД1(А-В)	13,5.. .16,5	10	25	50	1	2	10	10	10	10 <sup>3</sup>
К1401УД2А	1,5.. 16,5	3	50	5	150	1	0,35	12	2	0,2
К1407УД1	1,2.. 13,2	8	10	10	10 <sup>4</sup>	20	10	10	1	0,2
К1408УД1, КР1408УД1	7..40	5	70	8	40	0,5	1,5	19	5	1
К1426УД1	6..18	4	60	3	2000	5	5	16	10	0,1

### Приложение 3

#### НОМИНАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПОСТОЯННЫХ РЕЗИСТОРОВ И ЕМКОСТЕЙ ПОСТОЯННЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

1. Номинальные сопротивления (омы, килоомы, мегаомы) постоянных резисторов всех типов с допускаемыми отклонениями  $\pm 20\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 5\%$  в установленном для каждого типа резисторов диапазоне значений должны соответствовать числам, приведенным в табл.П.3.1, и числам, полученным путем умножения этих чисел на  $10^n$ , где  $n$  – целое положительное или отрицательное число.

2. Ряд Е6 (шесть чисел) входит в состав ряда Е12 (12 - чисел); в свою очередь, ряд Е12 входит в состав ряда Е24 (24 - числа), что отражено в построении таблицы. Например, начало ряда Е12 имеет вид: 1,0; 1,2; 1,5; 1,8 и т.д.; начало ряда Е24 – 1,0; 1,2; 1,3 и т.д. Ряд Е6 применяется для определения номинальных сопротивлений постоянных резисторов при допускаемом отклонении  $\pm 20\%$ ; ряд Е12 - при допускаемом отклонении  $\pm 10\%$ ; ряд Е24 - при допускаемом отклонении  $\pm 5\%$ .

Таблица П3.1

#### Ряды для определения номинальных сопротивлений и емкостей при допускаемых отклонениях $\pm 20\%$ , $\pm 10\%$ , $\pm 5\%$

E6	E12	E24	E6	E12	E24
1,0		1,1	3,3		3,6
	1,2	1,3		3,9	4,3
1,5		1,6	4,7		5,1
	1,8	2,0		5,6	6,2
2,2		2,4	6,8		7,5
	2,7	3,0		8,2	9,1

3. Номинальные сопротивления постоянных резисторов всех типов с допуском отклонением менее  $\pm 5\%$  ( $\pm 2\%$ ,  $\pm 1\%$  и др.) в установленном для каждого типа резисторов диапазоне значений должны соответствовать числам, приведенным в табл. 6. 3.2, и числам, полученным путем умножения этих чисел на  $10^n$ , где  $n$  – целое положительное или отрицательное число. Ряд E48 (48 чисел) входит в состав ряда E96 (96 чисел); в свою очередь, ряд E96 входит в состав ряда E192 (192 числа), что отражено в построении таблицы. Например, начало ряда E96 имеет вид: 100,102,105,107 и т.д., а начало ряда E192 – 100, 101, 102,104 и т.д.

4. Номинальные сопротивления переменных резисторов (единицы, десятки и сотни Ом, килом, единицы и десятки мегаом) должны соответствовать (ГОСТ 10318-80) ряду E6 (табл. 6.3.1)

Таблица П3.2

**РЯДЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОМИНАЛЬНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ЕМКОСТЕЙ  
ПРИ ДОПУСКАЕМЫХ ОТКЛОНЕНИЯХ МЕНЕЕ  $\pm 5\%$**

E48	E96	E192									
100		101	178		180	316		320	562		569
	102	104		182	184		324	328		576	583
105		106	187		189	332		336	590		597
	107	109		191	193		340	344		604	612
110		111	196		198	348		352	619		626
	113	114		200	203		357	361		634	642
115		117	205		208	365		370	649		657
	118	120		210	213		374	379		665	673
121		123	215		218	383		388	681		690
	124	126		221	223		392	397		698	706
127		129	226		229	402		407	715		723
	130	132		232	234		412	417		732	741
133		135	237		240	422		427	750		759
	137	138		243	246		432	437		768	777
140		142	249		252	442		448	785		796
	143	145		255	258		453	459		806	816
147		149	261		264	464		470	825		835
	150	152		267	271		475	481		845	856
154		156	274		277	487		493	866		876
	158	160		280	284		499	505		887	898
162		164	287		291	511		517	909		920
	165	167		294	298		523	530		931	942
169		172	301		305	536		542	953		965
	174	176		309	312		549	556		976	988

4. Номинальные емкости (до 91000 пФ) конденсаторов постоянной емкости с допускаемыми отклонениями  $\pm 20\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 5\%$  должны соответствовать (ГОСТ 2519-67) числам, приведенным в табл. 6.3.1, и числам, полученным путем умножения этих чисел на  $10^n$ , где  $n$  – целое положительное или отрицательное число.

Ряд E6 применяется для определения номинальных емкостей конденсаторов при допускаемом отклонении  $\pm 20\%$ ; ряд E12 – при допускаемом отклонении  $\pm 10\%$ ; ряд E24 – при допускаемом отклонении  $\pm 5\%$ .

5. Номинальные емкости (от 0,1 мкФ и выше) конденсаторов с бумажным и пленочным диэлектриком в прямоугольных корпусах должны соответствовать числам ряда:

0,1; 0,25; 1; 2; 4; 6; 8; 10; 20; 40; 60; 80; 100; 200; 400; 600; 800; 1000.

7. Номинальные емкости (в мкФ) оксидных алюминиевых конденсаторов должны соответствовать числам ряда:

0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 30; 100; 200; 300; 500; 1000; 2000; 5000.

8. Для конденсаторов с допускаемыми отклонениями менее  $\pm 5\%$  предусмотрены ряды E48, E96, E192 (табл. 6.3.2).

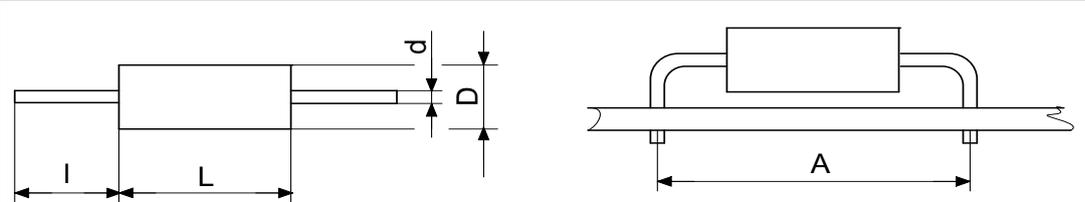
Соответствие номинальных сопротивлений (емкостей) числовым рядам приводятся в ГОСТе или ТУ на конкретные типы резисторов (конденсаторов).

Принятая плотность рядов обеспечивает, с одной стороны, полное использование предприятиями-изготовителями произведенных резисторов и конденсаторов, так как изделие с любым сопротивлением (емкостью) в пределах выпускаемого ряда номиналов при сортировке по номиналам окажется в поле допуска хотя бы одного из номиналов.

**РЕЗИСТОРЫ ПОСТОЯННЫЕ НЕПРОВОЛОЧНЫЕ.  
РЕЗИСТОРЫ ТИПОВ С1-4, С2-1 и С2-23 ПРЕДНАЗНАЧЕНЫ ДЛЯ РАБОТЫ В  
ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО, ПЕРЕМЕННОГО И ИМПУЛЬСНОГО ТОКА.**

Таблица ПЗ.3

**РАЗМЕРЫ РЕЗИСТОРОВ ТИПОВ С1-4, С2-1 и С2-23**



Тип резистора	Номинальная рассеиваемая мощность, Вт	Размеры, мм				
		L	D	l	d	A
С1-4, С2-1, С2-23	0,125	6.0	2,2	20	0,6	10
	0,25	7.0	3,0	20	0,6	12,5
	0,5	10.8	4,2	25	0,8	15
	1,0	13	6,6	25	0,8	17,5
	2,0	18.5	8,6	25	1,0	22,5

Таблица ПЗ.4

### ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ РЕЗИСТОРОВ МЛТ

Номинальная рассеиваемая мощность, Вт	Номинальное сопротивление, Ом	Допускаемое отклонение, %	Предельное напряжение, В	
			постоянное, переменное	импульсное
0,125	8,2 - 22	±5; ±10	200	350
	24 - 3,0x10 <sup>6</sup>	±2; ±5; ±10		
0,25	8,2 - 22	±5; ±10	250	450
	2,4 - 5,1x10 <sup>6</sup>	±2; ±5; ±10		
0,5	1,0 - 22	±5; ±10	350	750
	24 - 5,1x10 <sup>6</sup>	±2; ±5; ±10		
1,0	1,0 - 22	±5; ±10	500	1000
	24 - 10x10 <sup>6</sup>	±2; ±5; ±10		
2,0	1,0 - 22	±5; ±10	750	1200
	24 - 10x10 <sup>6</sup>	±2; ±5; ±10		

Примечание: номинальное сопротивление резисторов с допускаемыми отклонениями ±5% и ±10% соответствуют ряду E24, номинальные сопротивления резисторов с допускаемыми отклонениями ±2% - ряду E96.

### ПРИЛОЖЕНИЕ 4

#### ПЕРЕМЕННЫЕ ПОДСТРОЕЧНЫЕ РЕЗИСТОРЫ, РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КУРСОВОМ ПРОЕКТЕ

Приводятся сведения о некоторых типах подстроечных переменных резисторах, рекомендуемых для применения в курсовом проекте.

#### ПЕРЕМЕННЫЕ РЕЗИСТОРЫ

Таблица П4.1

Тип резистора	Резистивный элемент	Назначение	Работа в цепях вида	Вид резистора
СПЗ-16	Композиционный пленочный	Подстройка	1, 2, 3	
СПЗ-13а	То же	То же	1, 2, 3	

Таблица П4.2

Тип резистора	Резистивный элемент	Назначение	Работа в цепях вида	Вид резистора
СПЗ-19а	Композиционный пленочный	Подстройка	1, 2, 3	
СПЗ-19б	То же	То же	1, 2, 3	
СП5-16ВА	Проволочный	Подстройка	1, 2, 3	

Таблица П4.3

Тип резистора	Резистивный элемент	Назначение	Работа в цепях вида	Вид резистора
СП5-16ВВ	Проволочный	Подстройка	1, 2, 3	
СП5-16ВГ	То же	То же	1, 2, 3	

Примечание: цифрой 1 обозначена цепь постоянного, цифрой 2 – цепь переменного, цифрой 3 – цепь импульсного тока. Функциональная характеристика резисторов – линейная. Сопротивление подстроечного резистора изменяют отверткой.

**ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЗИСТОРОВ**

Тип резистора	Номинальное сопротивление, Ом	Допускаемое отклонение, %	Номинальная мощность, Вт	Предельное напряжение, В
СПЗ-16	470 - $1,0 \times 10^6$	$\pm 20$ ; $\pm 30$	0,25	250
СПЗ-13а	$1 \times 10^3$ - $1,0 \times 10^6$	$\pm 20$	0,12	150
СПЗ-19а	10 - $1,0 \times 10^6$	$\pm 10$ ; $\pm 20$	0,5	150
СПЗ-19б	10 - $1,0 \times 10^6$	$\pm 10$ ; $\pm 20$	0,5	150
СП5-16ВА	3,3 - $33 \times 10^3$	$\pm 5$ ; $\pm 10$	0,5	130
СП5-16ВВ	100 - 6800	$\pm 5$ ; $\pm 10$	0,12	29
СП5-16ВГ	47 - 4700	$\pm 5$ ; $\pm 10$	0,05	15

Примечание. Промежуточные значения номинальных сопротивлений соответствуют ряду Е6 (прил. ПЗ).

**ОКСИДНЫЕ, ПЛЕНОЧНЫЕ И КЕРАМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ, РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КУРСОВОМ ПРОЕКТЕ**

Таблица П5.1

							
Номинальная емкость, мкФ	Номинальное напряжение, В	Размеры, мм					
		D	H	d	l		
50	6,3	8,0	13,5	0,6	2,5		
100			15,5			5,0	
200		14,	16,5	0,9	7,5		
500		18,5	18,5				
10	10	6,5	13,5	0,6	2,5		
20		8,0					5,0
50		11,0			15,5		
100		12,5	16,5	0,9	7,5		
200		16,5	18,5				
500		18,5	25,5				
1000			45,5				
1	16	4,5	13,5	0,6	2,5		
5		6,5					
10		8,0					
20		11,0				18,5	0,9
30		12,0					
50		16,5					
100		18,5	22,5				
200		21,5	45,5				
1		25	8,0	13,5	0,6	2,5	
5			11,0	15,5		0,9	7,5
10	14,5						
20	16,5						
50	18,5		18,5				
100			45,5				
200							

Примечания: 1. Предназначены для работы в цепях постоянного и пульсирующего тока, а также в импульсном режиме; 2. Конденсаторы выпускаются полярными и неполярными; 3. В таблице показаны конденсаторы 1 и 2 вида; вид 3 - с лепестковыми выводами.

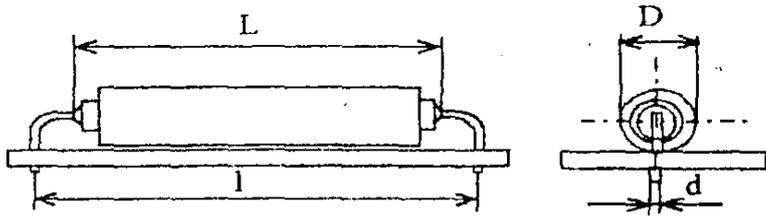
Таблица П5.2

## КОНДЕНСАТОРЫ ТИПА К50-35

Номинальная емкость, мкФ	Номинальное напряжение, В	Размеры, мм				
		D	H	d	l	
20	6,3	5,0	14,0	0,6	2,5	
30		7,0			5,0	
50		8,5			16,0	7,5
100						
200						
500						
10	10	5,0	14,0	0,6	2,5	
20		7,0			19,0	5,0
30						
50		11,5			14,0	7,5
100						
200						
500						
2000		13,0			19,0	10,0
2000	19,0	27,0				
5	16	5,0	14,0	0,6	2,5	
10		7,0			16,0	5,0
20						
30						
50		11,5			14,0	7,5
100						
200						
500						
1000		13,0			17,0	10,0
2000		15,0			19,0	
1000		17,0			27,0	
2000	19,0	46,0				
2	25	5,0	14,0	0,6	2,5	
5		7,0			16,0	5,0
10						
20						
30		8,5			14,0	7,5
50						
100						
200						
200		13,0			17,0	10,5
500		17,0			19,0	
1000		19,0			27,0	
1000	19,0	46,0				

Примечания: 1. Предназначены для работы в цепях постоянного пульсирующего тока, а также в импульсном режиме; 2. Конденсаторы неполярные

## КОНДЕНСАТОРЫ ОКСИДНЫЕ К53-7

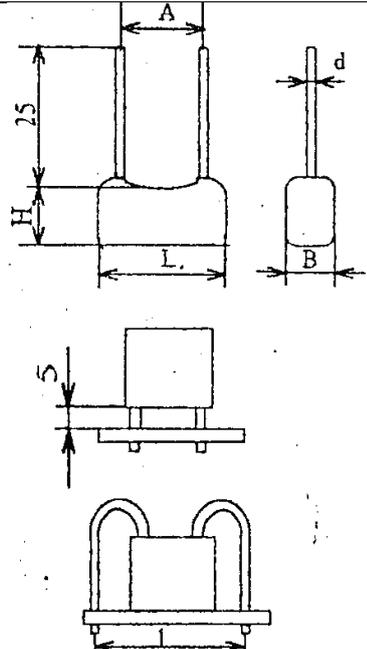


НОМИНАЛЬНАЯ ЕМКОСТЬ, МКФ	НОМИНАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ, В	РАЗМЕРЫ, ММ						
		D	L	D	L			
1,0	15	3,7	25,5	0,7	30,0			
1,5			4,5			27,5	32,5	
2,2		7,5			32,5	42,5		
3,3					37,5			47,5
4,7								
6,8		7,5			34,5	40,0		
10,0			37,5	42,5				
15,0		8,3			41,5	47,5		
22,0			30	3,7			18,5	0,7
0,1		4,5			25,5	32,5		
0,47				7,5	27,5		42,5	
1,0	37,5				47,5			
1,5								
2,2	7,5			34,5	40,0			
3,3		37,5				42,5		
4,7	8,3			41,5	47,5			
6,8		7,5				34,5	40,0	
10,0	37,5			42,5				
15,0		8,3			41,5	47,5		
22,0								

Примечание: предназначены для работы в цепях постоянного, пульсирующего, импульсного знакопеременного и переменного токов.

### КОНДЕНСАТОРЫ ОКСИДНЫЕ К53-7

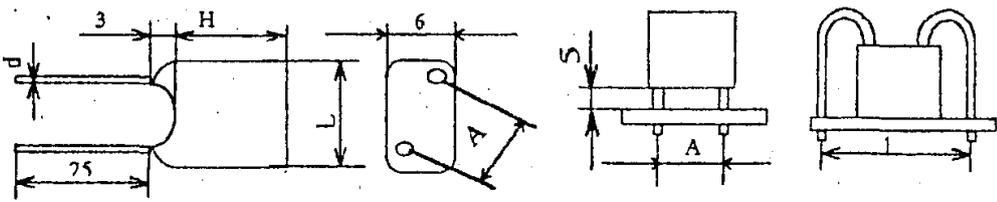
НОМИНАЛЬНАЯ ЕМКОСТЬ, МКФ	РАЗМЕРЫ, ММ					
	L	B	H	A	D	L
0,22	12	6	10	10	0,6	17,5
0,33		6,3	13			
0,47		8	15			
0,68	18	6,3	13	15	0,8	25
1		8	15			
1,5		8,5	19			
2,2		8,5	19	20	1,0	30
3,3		10,2				
4,7		12	25			



- Примечание: 1. Допустимые отклонения емкости  $\pm 5\%$ ;  $\pm 10\%$ ;  $\pm 20\%$ ;  
 2. Предназначены для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего тока; 3. Номинальное напряжение - 63 В.

Таблица П5.5

### КОНДЕНСАТОРЫ КЕРАМИЧЕСКИЕ КМ-4

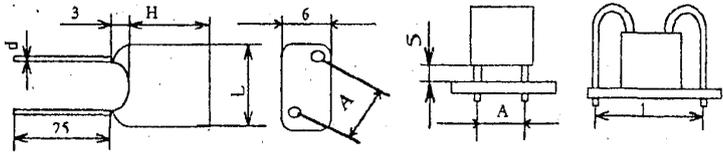


ТИПОВОЙ РАЗМЕР	РАЗМЕРЫ, ММ				
	L	H	A	D	L
1	6	6	2,5	0,5	10
2	8,5	8,5	5	0,5	12,5
3	11	11	7,5	0,5	15
4	13	13	7,5	0,6	15
5	15	15	10	0,6	17,5

Предназначены для работы в цепях постоянного, переменного тока и импульсных режимах.

**КОНДЕНСАТОРЫ КЕРАМИЧЕСКИЕ КЛС-1**

ТИПО- РАЗМЕР	РАЗМЕРЫ, ММ		
	В	L	L
1	4,5	5,5	12,5
2	5,5	6,5	12,5
3	6,5	6,5	15
4	6,5	9,5	15
5	6,5	11,5	15



The technical drawings show the physical dimensions and terminal configurations for the capacitors. The main drawing shows a capacitor with dimensions: width (B), length (L), and height (H). A detail shows a terminal with a diameter (D) and a length (L). Another detail shows a terminal with a diameter (D) and a length (L). A third detail shows a terminal with a diameter (D) and a length (L). A fourth detail shows a terminal with a diameter (D) and a length (L). A fifth detail shows a terminal with a diameter (D) and a length (L).

Таблица П5.7

**НОМИНАЛЬНАЯ ЕМКОСТЬ, ДОПУСТИМАЯ РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ ДЛЯ  
КОНДЕНСАТОРОВ КЛС-1**

ТИПО- РАЗМЕР	НОМИНАЛЬНАЯ ЕМКОСТЬ, пФ (до 6800), мкФ (от 0,01) для групп ТКЕ						РЕАКТИВН АЯ МОЩНОСТ Ь, ВАР, НЕ БОЛЕЕ
	М47, М75	М750, М1500	Н30	Н50	Н70	Н90	
1	30-56	330-510	1500; 2200	1500	4700	4700; 6800; 0,01; 0,015; 0,022	75
2	62-75	560-820	3300	2200	6800	0,033	100
3	82-130	910-1200	4700	3300	0,01	0,47	125
4	150-240	1300-1800	6800	4700; 6800	0,015	0,068	150
5	270-300	2000-3000	0,01	0,01	0,022; 0,033	0,1	175

Примечания: 1. Промежуточные значения номинальных емкостей соответствуют ряду Е24; 2. Номинальное напряжение конденсаторов групп Н70, Н90 равно 35 В, группы Н30 – 50 В, остальные группы – 80 В; 3. Допустимые отклонения емкости от номинальной для групп М47, М75, М750, М1500 равны  $\pm 5$ ,  $\pm 10$ ,  $\pm 20\%$ ; для группы Н50 –  $\pm 20\%$ ; для групп Н30, Н70, Н90 –  $+80$ ,  $-20\%$ .

**УСЛОВНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ  
ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАЛЬНЫХ КУРСОВОГО  
ПРОЕКТА**

Таблица Пб.1.

**РЕЗИСТОРЫ, КОНДЕНСАТОРЫ**

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Резистор постоянный		Конденсатор постоянной емкости	
Номинальная рассеиваемая мощность резистора, Вт  0,05 0,12 0,25 0,5 1,2 5		Конденсатор полярный	
		Конденсатор оксидный: а) полярный б) неполярный	
Резистор переменный		Конденсатор подстроечный	
Резистор подстроечный		Конденсатор подстроечный	
Резистор переменный в реостатном включении: а) общее обозначение б) подстроечный в) с нелинейным регулированием		Вариконд	
		Терморезистор	

Таблица Пб.2

## ПРИБОРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ

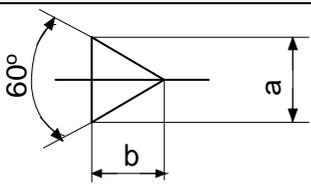
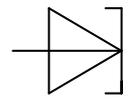
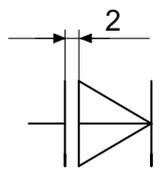
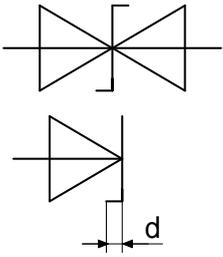
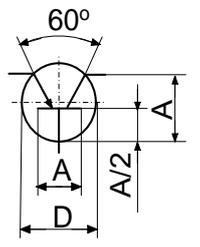
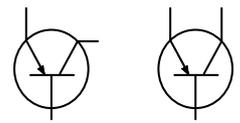
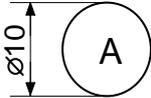
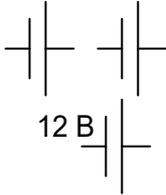
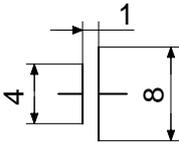
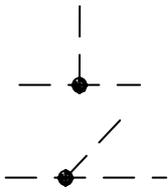
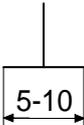
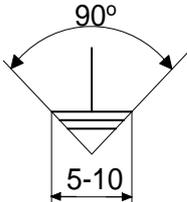
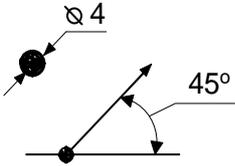
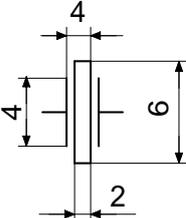
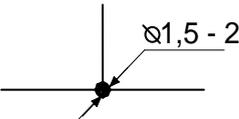
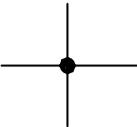
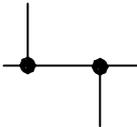
Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Диод. Размеры, мм a 5 6 b 4 5 d 1.5 2		Туннельный диод	
		Варикап	
Стабилитрон: а) двусторонний б) односторонний		Транзистор биполярный: а) типа р-п-р размеры, мм D 12 14 A 9 11 $A=3/4D$ ; б) типа п-р-п Примечание. Допускается обозначать транзисторы: а) без окружности б) с выводами Э, К, параллельными выводу Б	  
			Полевой МОП-транзистор: размеры, мм а) обогащенного типа с р-каналом D 12 14 C 4 5 б) обогащенного типа с п-каналом в) с выводом от подложки г) внутренним соединением подложки и истока д) обедненного типа с р-каналом е) обедненного типа с п-каналом

Таблица П6.3

## ПРОЧИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Прибор измерительный показывающий (амперметр)		Гальваническая или аккумуляторная батарея	
Элемент гальванический или аккумуляторный*		Разветвление линий механической связи переключателей и др.;	
Корпус электронного прибора, устройства			
Заземление		а) под углом 90°	
		б) под углом 45°	
Пьезоэлемент		Регулирование ручкой, выведенной наружу	
		Регулирование инструментом снаружи	
Линия электрической связи с ответвлениями		Регулирование инструментом внутри устройства	
		 или 	

## РЕКОМЕНДУЕМЫЕ НОМИНАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА НА ВЫХОДЕ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

В соответствии с действующими стандартами по выходной мощности, источники напряжения подразделяются на микромощные (до 1 Вт), малой мощности (1 - 10 Вт), средней мощности (10 - 100 Вт), повышенной мощности (100 - 1000 Вт) и большой (свыше 1000 Вт). Выходное напряжение до 100 В называют низким, 100 - 1000 В – средним и свыше 1000 В – высоким. Рекомендуемые номинальные значения напряжения и тока на выходе электропитающих устройств даны в табл. 6.7.1 и 6.7.2.

Таблица П7.1

### НОМИНАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

ДИАПАЗОН НАПРЯЖЕНИЙ, В	НАПРЯЖЕНИЕ, В					
	0,1...0,9	-	-	-	-	-
1,0...1,9	-	1,20	-	-	-	2,4
10,0...90	10	12,00	12,6	15	20	24
100...900	100	-	125,0	150	200	250
1000...9000	1000	-	1250,0	1500	2000	2500
0,1...0,9	-	-	0,4	-	0,6	-
1,0...1,9	-	3,0	4,0	5,0	6,0	9,0
10,0...90	27,0	30,0	40,0	48,0	60,0	80,0
100...900	-	300	400	500	600	800
1000...9000	-	3000	4000	5000	6000	8000

Таблица П7.2

### НОМИНАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ТОКА

ДИАПАЗОН ТОКОВ, А	ВЕЛИЧИНА ТОКА, А									
	0,0001...0,0009	0,0001	0,0002	0,0003	0,0004	0,0005	0,0006	-	-	-
0,001...0,0099	0,001	0,002	0,003	0,005	0,008	-	-	-	-	-
0,01...0,09	0,01	0,012	0,015	0,02	0,025	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08
0,1...0,9	0,1	0,12	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,60	0,80
1...9	1,0	1,2	1,5	2,0	2,50	3,0	4,0	5,0	6,00	8,00
10...90	10	12	15	20	25	30	40	50	60	80

**ПЕРЕЧЕНЬ ГОСУДАРСТВЕННЫХ СТАНДАРТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ  
ВЫПОЛНЕНИИ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

ГОСТ 2.702-75	Правила выполнения электрических схем
ГОСТ 2.710-81	Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах
ГОСТ 24375-80	Радиосвязь. Термины и определения
ГОСТ 2.304-81	Форматы
ГОСТ 7.1-76	Библиографическое описание документа.
ГОСТ 7.32-2001	Отчет о научно-исследовательской работе. Общие требования и правила оформления
ГОСТ 2.105-95	Общие требования к текстовым документам
ГОСТ 8.417-81	Единицы физических величин
ГОСТ 7.12-93	Сокращения русских слов и словосочетаний в библиографическом описании

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Алексеев А.Г., Войшвилло Г.В. Операционные усилители и их применение. – М.: Радио и связь, 1989. – 120 с.
2. Алексеенко А.Г., Шагурин И.И. Микросхемотехника: Учеб. пособ. для вузов. – М.: Радио и связь, 1990. – 496 с.
3. Бессарабов Б.Ф., Федюк В.Д., Федюк Д.В. Диоды, тиристоры, транзисторы и микросхемы широкого применения: Справочник. – Воронеж: ИПФ «Воронеж», 1994, - 720 с.
4. Бойко В.И., Гуржий А.Н., Жуйков В.Я., Зоря А.А., Спивак В.М. Схемотехника электронных систем. Аналоговые и импульсные устройства. – СПб.: БВХ-Петербург, 2004. – 496 с.: ил.
5. Виноградов Ю.В. Основы электронной и полупроводниковой техники: Учебник для студентов высш. техн. учебн. Заведений. – Изд. 2-е., доп., М.: Энергия, 1982. – 536 с.
6. Волович. Г. И. В68 Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. 3-е изд. стер. / Волович Г. И. - М.: Додэка-XXI, 2011. - 528 с.: ил.
7. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1991. – 622 с.
8. Кучумов А.И. Электроника и схемотехника: Учебное пособие. Второе издание перераб. и доп.- М.: Гелиос АРВ, 2004.- 336 с.
9. Лоскутов Е.Д. Схемотехника аналоговых электронных устройств. Саратов: Вузовское образование, 2016.- 264 с.
10. Малахов В.П. Электронные цепи непрерывного и импульсного действия: Учеб. пособ. Для вузов. – К.; Одесса: Либидь, 1991. – 256 с.
11. Малахов В.П. Схемотехника аналоговых устройств: Учебник для вузов. – Одесса: АстроПринт, 2000. – 212 с.
12. Марше Ж. Операционные усилители и их применение. – М.: Москва, 1976. – 258 с.
13. Павлов В.Н., Ногин В.Н. Схемотехника аналоговых устройств. Учебник для вузов.- 3-е изд.-Горячая линия – Телеком, . 2005.-320 с.
14. Петухов В.М. Транзисторы и их зарубежные аналоги. Справочник. В 4 т. Издание второе, исправленное. – М.: ИП РадиоСофт, 1999. – 688 с., ил.
15. Прянишников В.А. Электроника: Полный курс лекций.- 6-е изд.- СПб.: КОРОНА-Век, 2009.- 416 с.
16. Фолкенберри Л. Применения операционных усилителей и линейных ИС: Пер. с англ. — М.: Мир, 1985. — 572 с., ил.
17. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Изд. 7-е., М.: Мир, 2011.- 512 с.
18. Щербаков В.И., Грезов Г.И. Электронные схемы на операционных усилителях: Справочник. – К.: Техника, 1983. – 213 с.
19. Уве Наундорф. Аналоговая электроника. Основы, расчет, моделирование. – М.: Техносфера, 2008. - 472 с.
20. Эрглис К.Э., Степаненко И.П. Электронные усилители. – М.: Наука, 1964. – 540 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. СТРУКТУРА КУРСОВОГО ПРОЕКТА.....	4
1.1. Основные понятия.....	4
1.2. Стадии разработки радиоэлектронной аппаратуры.....	5
1.3. Стадии разработки курсового проекта.....	7
1.4. Состав курсового проекта.....	9
1.5. Разделы, чертежи и правила оформления курсового проекта .....	9
1.5.1. Разделы пояснительной записки и чертежи графической части курсового проекта.....	9
1.5.2. Правила оформления пояснительной записки.....	10
1.5.3. Требования к оформлению текстовых документов.....	12
2. ПРИМЕР ВАРИАНТА ЗАДАНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА.....	13
2.1. Пример варианта задания параметров и характеристик, необходимых для расчета усилителя.....	13
2.2. Варианты формы амплитудно-частотных характеристик УНЧ.....	13
3. СИНТЕЗ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРНОЙ И СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО УСТРОЙСТВА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ.....	16
3.1. Синтез схемы электрической структурной разрабатываемого устройства.....	16
3.2. Синтез схемы электрической функциональной разрабатываемого устройства.....	17
3.3. Электрический расчет.....	18
4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ. ПРИМЕРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ФРАГМЕНТОВ КУРСОВОГО ПРОЕКТА.....	19
4.1. Практические занятия 1 - 2. Электрический расчет усилителя мощности низкой частоты (режим работы оконечных транзисторов: В)...	19
4.1.1. Практическое занятие 1. Электрический расчет оконечного каскада.....	19
4.1.2. Практическое занятие 2. Электрический расчет предварительного каскада усилителя мощности.....	23
4.2. Практические занятия 3 - 4. Электрический расчет усилителя мощности низкой частоты (режим работы оконечных транзисторов: А-В).....	26
4.2.1. Практическое занятие 3. Электрический расчет оконечного каскада.....	26
4.2.2. Практическое занятие 4. Электрический расчет предварительного каскада усилителя мощности.....	31
4.3. Практическое занятие 5. Электрический расчет активного фильтра нижних частот первого порядка на основе интегрирующей RC- цепочки,	

включенной на входе ОУ.....	34
4.4. Практическое занятие 6. Электрический расчет активного фильтра нижних частот первого порядка на базе ОУ, включенного по схеме интегратора.....	37
4.5. Практическое занятие 7. Электрический расчет активного фильтра верхних частот первого порядка на основе дифференцирующей цепочки, включенной на входе ОУ.....	40
4.6. Практическое занятие 8. Электрический расчет активного фильтра верхних частот первого порядка на базе ОУ, включенного по схеме дифференцирования.....	42
4.7. Практическое занятие 9. Электрический расчет активного полосового фильтра первого порядка на основе ОУ.....	45
4.8. Практическое занятие 10. Электрический расчет входного каскада на базе неинвертирующего включения ОУ.....	48
4.9. Практическое занятие 11. Электрический расчет входного каскада на базе инвертирующего включения ОУ.....	50
<b>5. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ И ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....</b>	<b>53</b>
5.1. Варианты заданий к курсовому проекту.....	53
5.2. Варианты заданий к практическим занятиям.....	56
5.2.1. Варианты заданий к практическим занятиям 1 - 2. Электрический расчет усилителя мощности низкой частоты (режим В).....	56
5.2.2. Варианты заданий к практическим занятиям 3 - 4. Электрический расчет усилителя мощности низкой частоты (режим А – В).....	59
5.2.3. Варианты заданий к практическому занятию 5. Электрический расчет активного фильтра нижних частот первого порядка на основе интегрирующей RC- цепочки, включенной на входе ОУ.....	62
5.2.4. Варианты заданий к практическому занятию 6. Электрический расчет активного фильтра нижних частот первого порядка на базе ОУ, включенного по схеме интегратора.....	65
5.2.5. Варианты заданий к практическому занятию 7. Электрический расчет активного фильтра верхних частот первого порядка на основе дифференцирующей цепочки, включенной на входе ОУ.....	68
5.2.6. Варианты заданий к практическому занятию 8. Электрический расчет активного фильтра верхних частот первого порядка на базе ОУ, включенного по схеме дифференцирования.....	71
5.2.7. Варианты заданий к практическому занятию 9. Электрический расчет активного полосового фильтра первого порядка на основе ОУ.....	74
5.2.8. Варианты заданий к практическому занятию 10. Электрический расчет входного каскада на базе неинвертирующего включения ОУ.....	77
5.2.9. Варианты заданий к практическому занятию 11. Электрический расчет входного каскада на базе инвертирующего включения ОУ.....	80
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>83</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>84</b>

Приложение 1.....	84
Приложение 2.....	85
Приложение 3.....	87
Приложение 4.....	91
Приложение 5.....	94
Приложение 6.....	99
Приложение 7.....	102
Приложение 8.....	103
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	104
ОГЛАВЛЕНИЕ.....	105

Учебное издание

Горбатенко Владимир Валентинович

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ И КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«СХЕМОТЕХНИКА АНАЛОГОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ  
УСТРОЙСТВ»

В авторской редакции

Компьютерная верстка В.В. Горбатенко

Подписано к изданию 21.11.2017.

Объем данных 5,5 Мб.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14