

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ

СХЕМОТЕХНИКА АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ

Методические указания

к выполнению курсовой работы

для студентов специальности

1 – 36 04 02 «Промышленная электроника»

УДК 621.382:621.375.4

В методических указаниях к выполнению курсовой работы по дисциплине «Схемотехника аналоговых устройств» изложены тематика, состав и структура курсовой работы; приведены рекомендации и требования по выполнению отдельных разделов, требования к оформлению графической части и пояснительной записки.

Методические указания предназначены для студентов специальности 1–36 04 02 «Промышленная электроника» различных форм обучения

Составитель: А. С. Смаль, старший преподаватель

ВВЕДЕНИЕ

Учебная дисциплина «Схемотехника аналоговых устройств» является одним из первых специализированных курсов в подготовке специалистов квалификации «Инженер по радиоэлектронике».

Целью преподавания учебной дисциплины «Схемотехника аналоговых устройств» является формирование у студентов знаний и навыков, позволяющих осуществлять схемотехнический анализ, проектирование, компьютерное моделирование, а также квалифицированное техническое обслуживание аналоговых электронных устройств.

Основной задачей курсовой работы является получение практических навыков схемотехнического проектирования функциональных узлов промышленной электроники в соответствии с требованиями технического задания.

1 ТЕМАТИКА КУРСОВОЙ РАБОТЫ

В ходе выполнения курсовой работы студент должен продемонстрировать навыки в практической разработке электронных схем, реализующих единое электронное устройство. Примерный перечень тем курсовых работ:

- измерительный усилитель для работы с конкретными датчиками физических величин;
- блок активных фильтров;
- бестрансформаторный усилитель мощности;
- резонансный усилитель с трансформаторным выходным каскадом;
- регулируемый источник тока заданной мощности;
- диапазонный генератор гармонических колебаний.

2 СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа состоит из пояснительной записки и графической части.

Пояснительная записка представляет собой текстовый документ и является основным содержательным документом, включающим в себя все этапы разработки выбранного варианта устройства. Общий объем пояснительной записки должен составлять 15-25 листов формата А4.

К графическому материалу относят чертежи и схемы в виде законченных самостоятельных конструкторских документов или рисунков, выполненных на листах формата А3 или А4.

Пояснительная записка должна обязательно включать следующие структурные элементы в следующей последовательности:

- титульный лист;
- техническое задание (ТЗ);
- реферат;
- содержание;
- введение;
- основную (расчетную) часть;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения.

3 СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

3.1 Реферат

В реферате кратко излагаются сведения об объёме курсовой работы, количестве и характере иллюстраций, а также о количестве использованных источников; ключевые слова о разработанном устройстве, его характеристиках и параметрах, его особенностях, области применения и условиях эксплуатации. Указывается, что разработано и рассчитано автором, какие параметры получены. Реферат выполняется на листе формата А4 без рамки и основной надписи. Пример оформления реферата в Приложении А.

3.2 Содержание

В содержании приводятся все основные этапы выполнения курсовой работы с конкретным указанием листов: введение, обзор литературных источников, описание электрической схемы электронного устройства, описание электрической схемы источника питания, выбор и расчёт элементов схемы электронного устройства, выбор и расчёт элементов схемы источника питания, заключение, список использованных источников, приложения. Слово «Содержание» пишут с прописной буквы в середине строки. Слово «страница» не пишут. Первый лист содержания является первым листом пояснительной записки и выполняется на листе с основной надписью (форма 2, Приложение Б, б).

3.3 Введение

Введение кратко характеризует современное состояние электроники в целом и, в частности, в области разработки устройств по теме курсовой работы, назначение и область применения проектируемого устройства. Студент должен сформулировать цели курсовой работы и основные задачи, решения которых предусматриваются в курсовой работе.

3.4 Основная часть

В основной части раскрывается содержание основных этапов разработки электронного устройства. Основная часть курсовой работы должна содержать следующие разделы:

1. Обзор литературных источников

В этом разделе приводится обзор существующих аналогичных электронных устройств, известных из технической, учебной или патентной литературы, приводится анализ их недостатков и достоинств.

2. Описание электрической схемы электронного устройства

В этом разделе обосновывается выбор принципиальной схемы электронного устройства и указывается назначение всех элементов схемы этого устройства.

3. Выбор и расчёт элементов схемы электронного устройства

В этом разделе проводится расчёт элементов электронного устройства. Должны быть рассчитаны все основные параметры элементов, причём при выборе транзисторов и резисторов необходимо учитывать рассеиваемую на них мощность. Если расчёт показывает, что схема не позволяет получить соответствующие техническому заданию параметры, производится коррекция схемы или выбирается новая. Для проверки расчёта целесообразно использовать какую-либо программу компьютерного моделирования электронных устройств, например, *Micro-Cap*. С помощью этой программы возможен подбор элементов схемы с целью улучшения её параметров. Результаты моделирования приводятся в конце этого раздела.

3.5 Заключение

Дается краткий итог проведенного проектирования. В сжатом виде формулируются важнейшие выводы, к которым пришел студент в результате проделанной работы, приводится оценка полученных результатов, их сравнение с ТЗ. Возможно сравнение с устройством, выпускаемым промышленностью. Рекомендуется указать пути улучшения параметров разработанного устройства, а также привести методы и аппаратуру испытания и проверки устройства.

3.6 Приложения

В приложения включается графическая часть курсовой работы: схемы электрические принципиальные, перечни элементов, схема и протокол испытаний, а также вспомогательный материал: необходимые для расчетов вольтамперные характеристики полупроводниковых приборов, таблицы зависимостей, графики.

4 ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

При оформлении курсовой работы следует руководствоваться требованиями стандартов «Единой системы конструкторской документации (ЕСКД)». Основное обозначение разработанного комплекта документации включает в себя: обозначение специальности, номер группы и вид работы (курсовая работа), например, 1-36 04 02.ПЭ-10.КР.

В каждом конкретном случае оно дополняется обозначением вида документа:

- 1-36 04 02.ПЭ-10.КР.ПЗ – пояснительная записка;
- 1-36 04 02.ПЭ-10.КР.Э1 – структурная схема;
- 1-36 04 02.ПЭ-10.КР.Э2 – функциональная схема;
- 1-36 04 02.ПЭ-10.КР.Э3 – схема электрическая принципиальная;
- 1-36 04 02.ПЭ-10.КР.ПЭЗ – перечень элементов;
- 1-36 04 02.ПЭ-10.КР.СБ – сборочный чертёж печатной платы (компоновочный эскиз).

4.1 Оформление пояснительной записки

Пояснительная записка выполняется на листах формата А4 в соответствии с требованием ГОСТ 2.105-95 к оформлению текстовых документов. Первым является титульный лист. Далее помещается задание на курсовую работу и реферат. Затем следует содержание. Нумерация листов пояснительной записки начинается с содержания.

Каждый лист пояснительной записки должен иметь рамку и основную надпись по ГОСТ 2.101-93. Основная надпись по форме 2 (Приложение Б, б) выполняется только на первом текстовом листе (лист с содержанием), на остальных листах основная надпись чертится по форме, показанной в Приложении Б, г, где заполняется номер листа.

Абзацы в тексте начинают отступом 15 – 17 мм. Расстояние от рамки до границ текста в начале и в конце строк – не менее 3 мм, а от верхней или нижней строки текста до верхней или нижней линии рамки – не менее 10 мм. Высота шрифта – не менее 2,5 мм (рекомендуется 14 пунктов). Текст печатается через 1 – 1,5 межстрочных интервала.

Текст пояснительной записки разделяют на разделы и при необходимости на подразделы, пункты, подпункты. Разделы должны иметь порядковые номера, обозначенные арабскими цифрами без точки и записанные с абзачного отступа. Номер подраздела состоит из номеров раздела и подраздела, разделенных точкой. В конце номера подраздела точка не ставится. Разделы, как и подразделы, могут состоять из одного или нескольких пунктов. Номер пункта отделяется от номера раздела или подраздела точкой, а в конце номера пункта точка не ставится.

Внутри текста пунктов или подпунктов могут быть приведены перечисления.

Перед каждой позицией перечисления ставится дефис или, при необходимости со- слаться на этот пункт в тексте пояснительной записки на одно из перечислений, строч- ная буква, после которой ставится скобка. Для дальнейшей детализации перечислений используют арабские цифры, после которых ставится скобка, а запись производится с абзацного отступа.

Каждый пункт, подпункт и перечисление записывается с абзацного отступа.

Разделы и подразделы должны иметь заголовки. Пункты, как правило, заголовков не имеют. Заголовки должны чётко и кратко отражать содержание разделов и подразделов.

Расстояние между заголовками разделов и подразделов – 2 интервала, между заго- ловками и текстом – 3 интервала. Заголовки следует печатать без подчёркивания с про- писной буквы без точки в конце. Переносы слов в заголовках не допускаются. Если заго- ловок состоит из двух предложений, их разделяют точкой.

Каждый раздел пояснительной записки рекомендуется начинать с нового листа.

Нумерацию формул, рисунков и таблиц рекомендуется выполнять в пределах каждо- го раздела. Нумерацию страниц целесообразно проставлять вручную после окончатель- ного оформления пояснительной записки.

4.2 Оформление графической части

Графическая часть курсовой работы включает в себя схемы электрические принципи- альные, перечни элементов, чертежи печатных плат, сборочные чертежи. Схемы следует выполнять в соответствии с общими требованиями ГОСТ 2.701-84 и ГОСТ 2.702-2011. На схемах электрических принципиальных условные графические обозначения (УГО) элемен- тов должны выполняться согласно соответствующим стандартам, буквенно цифровые обо- значения по ГОСТ 2.710-2001, обозначения проводников и соединений по ГОСТ 2.2709-89. Схемы выполняют с основной надписью (формы 1, 2а, Приложение Б).

При составлении схемы устройства, следует придерживаться общепринятого прави- ла: вход – слева, выход – справа. Основное направление прохождения сигнала – слева направо и сверху вниз. Возле каждого элемента (желательно сверху или справа) должно быть указано его позиционное обозначение ($R1$, $R2$, $C1$, $C2$ и т.д.). Нумеровать элемен- ты необходимо сверху вниз – слева направо или слева направо – сверху вниз.

Линии-выводы эмиттера и коллектора в УГО биполярного транзистора (за предела- ми окружности, символизирующей его корпус) можно располагать как перпендикулярно линии-выводу базы, так и параллельно ей – в некоторых случаях это позволяет сделать схему компактнее. Излом линии электрической связи, идущей к базе такого транзистора, а также к символам затвора, истока и стока полевого транзистора, допускается на рас- стоянии не менее 5 мм от окружности-корпуса (в масштабе 1:1). При начертании УГО транзисторов разрешается не использовать окружность.

Данные об элементах принципиальной схемы, полученные в результате электриче- ского расчета и выбора типоминалов элементов, записывают в перечень элементов.

Если перечень элементов помещают на листе со схемой, его располагают, как прави- ло, над основной надписью. Расстояние между перечнем элементов и основной надписью должно быть не менее 12 мм. Продолжение перечня элементов помещают слева от ос- новной надписи, повторяя заголовок таблицы. Над таблицей дают надпись «Перечень элементов». При выполнении перечня в виде самостоятельного документа, его оформляют на листах формата А4 с основной надписью (форма 2, 2а, Приложение Б, б).

Связь перечня с условными графическими обозначениями элементов на схеме осуществляется через позиционные обозначения элементов.

Элементы в перечне записываются группами в алфавитном порядке буквенных позиционных обозначений. В пределах каждой группы буквенных обозначений, элементы располагают по возрастанию порядковых номеров.

Элементы одного типа с одинаковыми электрическими параметрами, имеющие на схеме последовательные порядковые номера, допускается записывать в перечень в одну строку. В графе «Поз. обозн.» — вписывают позиционные обозначения с наименьшим и наибольшим порядковым номерами, например: R1, R2; C2...C12, в графу «Кол.» — общее количество элементов.

Не допускается вписывать в одну строку элементы одного типа с одинаковыми параметрами, но с непоследовательными порядковыми номерами, например: R1, R3, R7.

Некоторые условные графические обозначения приведены в Приложении В.

Пример оформления схемы электрической принципиальной – в Приложении Г.

Пример оформления перечня элементов – в Приложении Д.

4.3 Список использованных источников

Список использованной литературы приводится после заключения и оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-2003. Списку литературы должно предшествовать заглавие «Список использованных источников». В список входит техническая и патентная литература, ГОСТы, периодические издания, справочники, учебные и методические пособия, использованные в ходе выполнения курсового проекта. В список включают все источники, на которые имеются ссылки в пояснительной записке. Источники в списке располагают в порядке их упоминания в тексте пояснительной записки и нумеруют арабскими цифрами.

Примеры:

Учебники, монографии

1. Валенко, В.С. *Электроника и микросхемотехника [Текст]* / В.С. Валенко, М.С. Хандогин. – Минск : Бестпринт, 2003. – 320 с.

Статьи в журналах

2. Абрамэйко, С. В. *Оперативное совмещение цифровых аэрокосмоснимков и карт по опорным точкам в специализированной геоинформационной системе* / С. В. Абрамэйко, С. П. Боричев // *Вестник Белорусского государственного университета. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика.* - 2010. - N 3. - С. 57-66.

Стандарты

3. ГОСТ Р 51771-2001. *Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Входные и выходные параметры и типы соединений. Технические требования [Текст]*. - Введ. 2002-01-01. - М. : Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2001. - IV, 27с.: ил.; 29 см.

Каталоги, технические паспорта

4. *Машина специальная листозащитная ИО 217М [Текст] : листок-каталог : разработка и изготовитель Кемер. з-д электромонтаж. изделий.* - М., 2002. – 3 л. ; 20 см. - 350 экз.

При использовании информации, представленной в электронном виде (на съёмных носителях, в сети Интернет и др.), библиографическая запись, помимо основных элементов описания, должна содержать элемент – [Электронный ресурс], [Электронны

ресурс], [Electronic resource], который располагается после основного заглавия в квадратных скобках. Если электронные документы размещаются на съемных носителях (CD-ROM, DVD-ROM и др.), то в области количественной характеристики вносится информация о физических носителях и их количестве. При составлении библиографического описания на ресурсы из Интернета, помимо основных сведений о ресурсе, необходимо приводить интернет-адрес ресурса (URL) и дату обращения к нему. Эта информация располагается после места публикации в сети и записывается следующим образом:

Режим доступа : <http://elib.bsu.by/handle/123456789/40723>. – *Дата доступа*: 29.05.2013.

Сведения о месте создания ресурса и его изготовителе являются факультативными, поэтому допускается их не приводить.

Примеры:

5. Журавков, М. А. О перспективах использования теории дробного исчисления в механике [Электронный ресурс] / М. А. Журавков, Н. С. Романова ; М-во образования РБ, БГУ. – Минск : БГУ, 2013. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

6. Муханин, Л. Г. Схемотехника измерительных устройств [Электронный ресурс] : учебное пособие / Л. Г. Муханин. – 2016. – 284 с. – *Режим доступа* : http://www.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=68&pl1_id=275. – Загл. с экрана.

7. Члиянц Г. Создание телевидения // QRZ.RU: сервер радиолюбителей России. 2004. URL: <http://www.qrz.ru/articles/article260.html> (дата обращения: 21.02.2006).

8. Справочники по полупроводниковым приборам // [Персональная страница В.Р. Козака] / Ин-т ядер. физики. [Новосибирск, 2003]. URL: <http://www.inp.nsk.su/~kozak/start.htm> (дата обращения: 13.03.06).

5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

При расчёте электронного устройства необходимо провести анализ исходных данных в задании для проектирования, рассмотреть условия эксплуатации, учитывая воздействие основных дестабилизирующих факторов.

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

После выполнения расчёта параметров электрорадиоэлементов (транзисторов, резисторов, конденсаторов) выбираются по справочникам конкретные типы элементов, выпускаемые промышленностью, в соответствии с их условиями эксплуатации и обоснованными допусками и далее используются не расчётные, а номинальные их значения сопротивлений резисторов и ёмкостей конденсаторов.

В данной курсовой работе рекомендуется выбирать номинальные значения сопротивлений резисторов и ёмкостей конденсаторов в соответствии со стандартным рядом номинальных значений E24 (Приложение Ж).

Многокаскадные усилители рассчитывают, начиная с выходного (оконечного) каскада. Получаемые при этом входные параметры (напряжение, $U_{BX i} = U_{ВЫХ i} / K_{U i}$, и сопротивление $R_{BX i}$) рассчитываемого (i -того) каскада являются исходными данными ($U_{Н (i-1)} = U_{ВХ i}$, $R_{Н (i-1)} = R_{ВХ i}$) для расчёта предшествующего ($i - 1$ -го) каскада.

На основании рассчитанных значений из справочной литературы выбираются биполярные транзисторы (БТ) по следующим параметрам:

- максимальная мощность, рассеиваемая на коллекторе, $P_{K \max \text{ доп.}}$;
- максимальный ток коллектора, $I_{K \max \text{ доп.}}$;
- максимально допустимое напряжение между коллектором и эмиттером, $U_{КЭ \max \text{ доп.}}$;
- коэффициент передачи базового тока, $h_{21Э}$;
- предельная (граничная) частота, $f_{h_{21Э}}$ ($f_{гр}$).

Полевые транзисторы (ПТ) выбираются по аналогичным параметрам:

- максимальная мощность, рассеиваемая на стоке, $P_{С \max \text{ доп.}}$;
- максимальный ток стока, $I_{С \max \text{ доп.}}$;
- максимально допустимое напряжение между стоком и истоком, $U_{СИ \max \text{ доп.}}$;
- крутизна, S ;
- пороговое напряжение, $U_{ЗИ \text{ пор.}}$, или напряжение отсечки, $U_{ЗИ \text{ отс.}}$.

Операционные усилители (ОУ) выбирают по следующим основным параметрам:

- максимальное значение выходного напряжения, $U_{ВЫХ \max}$;
- минимальное сопротивление нагрузки, $R_{Н \min}$, или максимальный выходной ток

$I_{ВЫХ \min}$;

- частота единичного усиления F_1 ;
- дифференциальный коэффициент усиления по напряжению, $K_{ОУ}$;
- напряжение смещения $U_{см.}$;
- входное сопротивление, $R_{ВХ}$, или средний входной ток, $I_{ВХ \text{ ср.}}$;
- напряжение источников питания $U_{И.п.}$.

5.1 Расчёт оконечного каскада

Выбор режима работы и схемы оконечного каскада производят исходя из следующих предпосылок:

- при $P_{ВЫХ} \leq 50$ мВт обычно используют однотактную схему с маломощным транзистором, работающим в режиме класса *A* ;
- при $P_{ВЫХ} \leq 200$ мВт применяется двухтактная схема и режимы работы классов *AB* или *B*. Используются маломощные транзисторы или транзисторы средней мощности, работающие в облегченном режиме ;
- при $P_{ВЫХ} \leq 1,2$ Вт применяется, как правило, двухтактная схема в режимах *AB* или *B* с использованием в ней транзисторов средней мощности ;
- при большей мощности применяется двухтактная схема на транзисторах большой мощности.

Двухтактным называется каскад, в котором объединены два однотактных усилительных каскада, работающих в противофазе на одну общую нагрузку. В соответствии с этим двухтактный каскад состоит из двух половин, называемых плечами.

В данной курсовой работе предлагаются к расчёту двухтактные оконечные каскады (усилители мощности) на комбинированных биполярных или полевых транзисторах. На рисунке 5.1.1 показаны усилители мощности классов *B* и *AB* на комплементарной паре биполярных транзисторов. На полевых транзисторах с изолированным затвором оконечные каскады будут выглядеть аналогично.

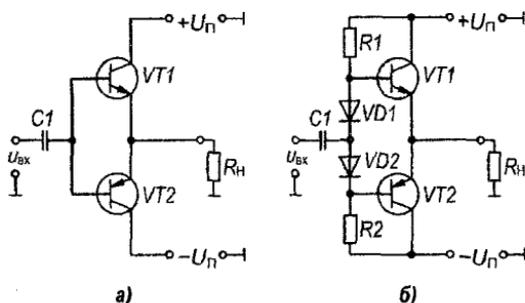


Рисунок 5.1.1 – Двухтактные усилители мощности на комплементарных транзисторах класса В (а); класса АВ (б)

Исходными данными для расчёта оконечного каскада усилителя на транзисторах могут являться различные параметры, например, выходная мощность $P_{\text{ВЫХ}}$, сопротивление нагрузки $R_{\text{Н}}$, максимальное напряжение на нагрузке $U_{\text{Нм}}$, максимальный ток в нагрузке $I_{\text{Нм}}$. Зная какую-либо пару заданных параметров, при необходимости можно найти остальные из следующих соотношений:

$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{Нм}} I_{\text{Нм}}}{2} = \frac{U_{\text{Нм}}^2}{2R_{\text{Н}}} = \frac{I_{\text{Нм}}^2 R_{\text{Н}}}{2}; \quad (5.1.1)$$

$$U_{\text{Нм}} = \sqrt{2P_{\text{ВЫХ}} \cdot R_{\text{Н}}}; \quad I_{\text{Нм}} = \frac{U_{\text{Нм}}}{R_{\text{Н}}} = \sqrt{\frac{2P_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{Н}}}}.$$

В двухтактных бестрансформаторных каскадах в силу их симметричности проводится расчет одного плеча. Значение напряжение питания $U_{\text{П}}$ одного плеча двухтактного каскада задают, исходя из максимального напряжения на нагрузке $U_{\text{Нм}}$ (либо заданного, либо найденного с использованием соотношений (5.1.1)):

$$U_{\text{П}} = U_{\text{Нм}} + U_{\text{КЭ min}} + (1 \dots 3)B,$$

где $U_{\text{КЭ min}}$ – остаточное напряжение между коллектором и эмиттером биполярного транзистора при токе коллектора $I_{\text{К max}} = I_{\text{Нм}}$ (см. рисунок 5.1.2, б).

Желательно выбирать напряжение питания согласно рекомендованным стандартным значениям:

6 В; 9 В; 12 В; 15 В; 20 В; 24 В; 27 В; 30 В; 36 В.

Выбор транзисторов производится с учётом следующих условий:

$$U_{\text{КЭ max доп.}} > 2U_{\text{П}}; \quad I_{\text{К max доп.}} > I_{\text{К max}}; \quad P_{\text{К max доп.}} > P_{\text{К max}} = \frac{U_{\text{П}}^2}{4\pi^2 R_{\text{Н}}}.$$

$$\text{Мощность, отбираемая каскадом от источника питания: } P_{\text{ИСТ}} = \frac{U_{\text{П}}^2}{2\pi R_{\text{Н}}}.$$

Для определения входного сопротивления, $r_{\text{ВХ}}$, одного плеча усилительного каскада используют входные и выходные ВАХ представленные на рисунке 5.1.2. По выходным

ВАХ (рис. 5.1.2, б) находят максимальную амплитуду тока базы $I_{B \max}$, а по входной ВАХ (рис. 5.1.2, а) – максимальную амплитуду напряжения $U_{BЭ \max}$. Тогда

$$r_{BX} \approx \frac{I_{B \max}}{U_{BЭ \max}} + (1 + h_{21Э})R_H,$$

где $h_{21Э}$ – коэффициент передачи эмиттерного тока транзистора.

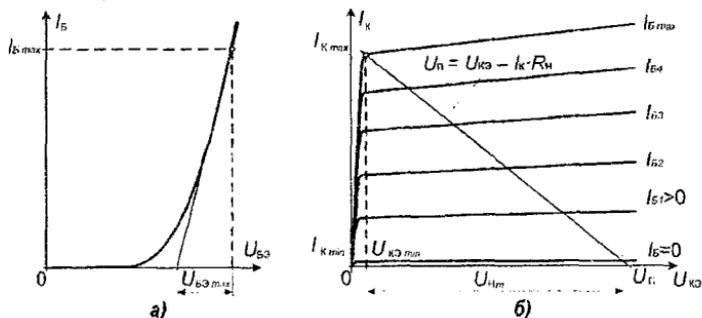


Рисунок 5.1.2 – Входные (а) и выходная (б) вольтамперные характеристики биполярного транзистора

Учитывая, что комплементарные транзисторы усилительного каскада включены по схеме с общим коллектором, коэффициент передачи по напряжению

$$K_U \approx (1 + h_{21Э}) \frac{R_H}{r_{BX}}.$$

При расчёте оконечного каскада, работающего в режиме класса *AB* (см. рис. 5.1.1, б), необходимо задавать ток I_D , протекающий через диоды, больше максимального тока базы $I_{B \max}$. Этот ток задаётся с помощью резисторов

$$R1 = R2 = \frac{U_H - U_{VD}}{I_D}, \quad (5.1.2)$$

где U_{VD} – напряжения на открытом диоде (0,6 ... 0,7 В для кремниевых диодов).

Так как в курсовой работе предшествующие каскады строятся на операционных усилителях, имеющих ограничения по выходному току, необходимо рассчитать входной ток оконечного каскада:

$$I_{BX} = \frac{U_{BX}}{R_{BX}},$$

где $U_{BX} = U_{Hm}/K_U$ – входное напряжение оконечного каскада; R_{BX} – его входное сопротивление, зависящее от класса усиления;

– при работе в режиме класса *B* $R_{BX} = r_{BX}$;

– при работе в режиме класса *AB* $R_{BX} = r_{BX} \parallel R1$.

Если окажется, что входное сопротивление меньше минимального сопротивления нагрузки операционного усилителя (или входной ток превышает максимально допустимый выходной ток операционного усилителя), то следует увеличить входное сопротивление. Для этого можно, например, использовать в качестве транзисторов $VT1$ и $VT2$ составные транзисторы. В этом случае количество диодов должно соответствовать количеству транзисторов в одном плече каскада. Это приведёт к увеличению общего падения напряжения на диодах, что должно быть учтено при расчёте резисторов $R1 = R2$ (5.1.2).

Оконечные каскады на полевых транзисторах рассчитываются аналогичным образом. В усилительных каскадах на полевых транзисторах обычно используют полевые транзисторы с индуцированным каналом. Для получения режима работы каскада класса AB в этом случае в цепи затворов используют делители напряжения на резисторах, ток которых принимают равным нескольким единицам – десяткам микроампер, что обеспечивает достаточно большое входное сопротивление.

5.2 Избирательные усилители

Избирательные усилители предназначены для усиления сигналов в некоторой узкой полосе частот. Их амплитудно-частотная характеристика, примерный вид которой показан на рисунке 5.2.1, должна обеспечить требуемое усиление в заданной полосе частот и достаточно крутой спад усиления вне этой полосы. Полоса пропускания избирательного усилителя $\Delta f = f_B - f_H$ определяется на уровне $K_{U0}/\sqrt{2}$, где K_{U0} – максимальный коэффициент усиления на частоте f_0 . Отношение боковых частот для таких усилителей $f_B/f_H = 1,001 \dots 1,1$. Селективность усилительных свойств оценивают добротностью $Q = f_0/\Delta f$, величина которой может составлять десятки и сотни.

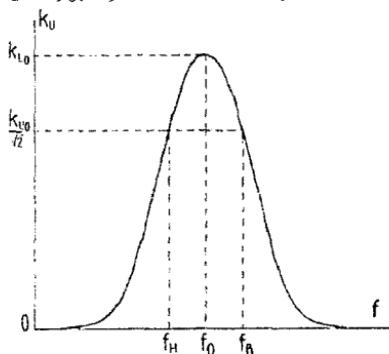


Рисунок 5.2.1 – Амплитудно-частотная характеристика избирательного усилителя

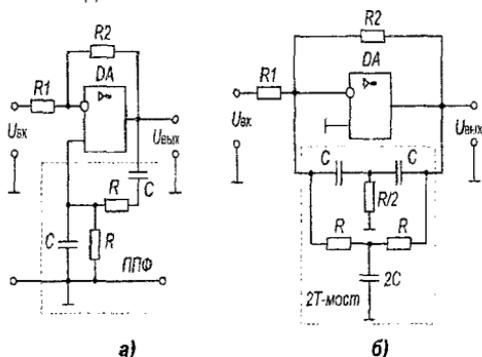


Рисунок 5.2.2 – Избирательные усилители с полосовым пропускающим фильтром (а) и с двойным Т-мостом (б)

Избирательные усилители при частотах свыше десятков килогерц создают введением параллельного колебательного контура в цепь нагрузки усилительных каскадов (резонансные усилители). Низкочастотные узкополосные усилители выполняют с обратными связями через частотно-зависимые цепи (рисунок 5.2.2).

На рисунке 5.2.2, а приведена схема избирательного усилителя с полосовым пропускающим фильтром (ППФ), также её называют избирательным усилителем с мостом Вина. В этой схеме ППФ (обведён штриховой линией) включается в цепь

положительной обратной связи (ПОС) ОУ, а отрицательная обратная связь (ООС) обеспечивается резистором R_2 . Коэффициент передачи цепи ПОС на частоте настройки $f_0 = 1/(2\pi RC)$ достигает своего максимального значения $\gamma_{\text{ПОС}} = 1/3$, а коэффициент передачи цепи ООС $\gamma_{\text{ООС}} = R_1/(R_1 + R_2)$. Добротность Q и коэффициент усиления K_{U_0} усилителя на частоте настройки (квазирезонансной частоте) f_0 соответственно

$$Q = \frac{1}{(1/\gamma_{\text{ПОС}}) - (1/\gamma_{\text{ООС}})}; \quad (5.2.1)$$

$$K_{U_0} \approx - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{\gamma_{\text{ООС}} - \gamma_{\text{ПОС}}}. \quad (5.2.2)$$

Схему рассчитывают следующим образом.

Задавая значение ёмкости конденсаторов $C = (0,01 \dots 0,1)$ мкф, рассчитывают сопротивление резисторов $R = 1/(2\pi f_0 C)$, затем по известной добротности Q из выражения (5.2.1) находят

$$\gamma_{\text{ООС}} = \frac{1}{(1/\gamma_{\text{ПОС}}) - (1/Q)} = \frac{Q}{(Q/\gamma_{\text{ПОС}}) - 1} = \frac{Q}{3Q - 1},$$

здесь учтено, что $\gamma_{\text{ПОС}} = 1/3$. Затем, задавая, например, сопротивление резистора R_1 , находят

$$R_2 = R_1 \cdot \left(\frac{1}{\gamma_{\text{ООС}}} - 1 \right) = R_1 \cdot \left(2 - \frac{1}{Q} \right).$$

Полученные значения подставляют в (5.2.2) и находят коэффициент усиления K_{U_0} .

На рисунке 5.2.2,б показана схема избирательного усилителя на ОУ с включённым в цепь ООС двойным Т-образным мостом (2Т-мост), который является режекторным фильтром (или *полосовым загораживающим фильтром*). Коэффициент передачи 2Т-моста на частоте настройки $f_0 = 1/(2\pi RC)$ стремится к нулю, поэтому на этой частоте коэффициент усиления K_{U_0} и добротность Q соответственно

$$K_{U_0} \approx - \frac{R_2}{R_1}; \quad Q \approx \frac{R_2}{2R}.$$

По известным параметрам частоте настройки f_0 , добротности Q , и коэффициенту усиления K_{U_0} схему рассчитывают следующим образом:

- задаётся значение ёмкости конденсаторов $C = (0,01 \dots 0,1)$ мкф;
- рассчитывается сопротивление $R = 1/(2\pi f_0 C)$;
- рассчитывается сопротивление $R_2 = 2 R Q$;
- рассчитывается сопротивление $R_1 = R_2 / |K_{U_0}|$.

Если полученное значение K_{U_0} не удовлетворяет техническому заданию, то с помощью дополнительного каскада на ОУ необходимо обеспечить усиление до требуемого значения.

Замечание: Для исключения влияния внутреннего сопротивления источника сигнала его желательно подключать к избирательному усилителю через неинвертирующий повторитель напряжения. В противном случае сопротивление R_1 надо будет заменить на $R_{\text{сум}} = R_1 + R_{\Gamma}$, где R_{Γ} – внутренне сопротивление источника сигнала.

5.3 Активные фильтры

Активный фильтр – схема, состоящая из резисторов, конденсаторов и активных элементов, рассчитанная на пропускание сигналов в определённой полосе частот и подавление сигналов за пределами этой полосы.

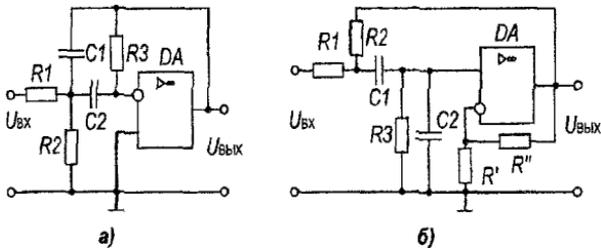


Рисунок 5.3.1 – Активные фильтры 2-го порядка с инвертирующим (а) и неинвертирующим (б) включением операционного усилителя

На рисунке 5.3.1, а представлена схема активного фильтра второго порядка с двухпетлевой цепью отрицательной обратной связи с инвертирующим включением операционного усилителя. Параметры этого фильтра:

частота настройки
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}};$$

добротность
$$Q = \frac{1}{C_1 + C_2} \sqrt{\frac{(R_1 + R_2) R_3 C_1 C_2}{R_1 R_2}};$$

коэффициент усиления
$$K_{U_0} = K_U(f = f_0) = -\frac{C_2 R_3}{(C_1 + C_2) R_1}.$$

На рисунке 5.3.1, б – схема активного фильтра второго порядка с конечным усилением с неинвертирующим включением операционного усилителя (так называемый полосовой пропускающий фильтр Саллена-Кея) со следующими параметрами:

частота настройки
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}};$$

добротность
$$Q = \sqrt{\frac{(R_1 + R_2) C_1 C_2}{R_1 R_2 R_3}} \cdot \frac{1}{a};$$

коэффициент усиления $K_{U_0} = K_U(f = f_0) = K' \frac{C_1}{R_1 a},$ (5.3.1)

где $a = \frac{C_1}{R_3} + \frac{C_1 + C_2}{R_1} + \frac{C_2}{R_2} + \frac{C_1}{R_2} (1 - K'); K' = 1 + \frac{R''}{R'}.$

Если известны добротность Q , частота настройки f_0 и коэффициент усиления K_{U_0} усилителя на частоте настройки, то рекомендуется следующий порядок расчёта фильтров, представленных на рисунке 5.3.1.

- Для фильтра с инвертирующим включением операционного усилителя (рис. 5.3.1, а):
 - задаётся значение ёмкости конденсаторов $C_1 = C_2 = C = (0,01 \dots 0,1)$ мкф;
 - рассчитывается вспомогательный коэффициент $A = 2\pi f_0 C$;
 - после этого рассчитываются сопротивления резисторов R_1, R_2, R_3 :

$$R_1 = \frac{Q}{K_0 A}; \quad R_2 = \frac{1}{A(2Q - \frac{K_0}{Q})}; \quad R_3 = \frac{2Q}{A}.$$

- Для фильтра с неинвертирующим включением операционного усилителя (рис. 5.3.1, б):
 - задаётся значение ёмкости конденсаторов $C_1 = (0,01 \dots 0,1)$ мкф;
 - рассчитывается вспомогательный коэффициент $A = 2\pi f_0 C$;
 - после этого рассчитываются ёмкость конденсатора $C_2 = C_1/2$ и сопротивления резисторов R_1, R_2, R_3 :

$$R_1 = \frac{2}{A}; \quad R_2 = \frac{2}{3A}; \quad R_3 = \frac{4}{A};$$

- рассчитывается коэффициент усиления усилителя с конечным усилением

$$K' = \frac{6,5 Q - 1}{3 Q};$$

- затем, задавая, например, сопротивление резистора R' , находят

$$R'' = R'(K' - 1).$$

- после проведения расчётов элементов рассчитывают коэффициент усиления K_{U_0} усилителя на частоте настройки, при этом выражение (5.3.1) примет вид:

$$K_{U_0} = \frac{K'}{6,5 - 3K'}, \quad \text{или} \quad K_{U_0} = \frac{6,5 Q - 1}{3}.$$

Если полученное значение K_{U_0} не удовлетворяет техническому заданию, то с помощью дополнительного каскада на ОУ необходимо обеспечить усиление до требуемого значения.

Замечание: для исключения влияния внутреннего сопротивления источника сигнала его желательно подключать к активным фильтрам через неинвертирующий повторитель напряжения. В противном случае при задании сопротивления резистора R_1 необходимо будет учитывать внутреннее сопротивление источника сигнала, т.е. R_1 надо будет заменить на $R_{\text{сум}} = R_1 + R_r$, где R_r – внутренне сопротивление источника сигнала.

5.4 Генераторы колебаний

Генератором называется автоколебательная структура, в которой энергия источника питания преобразуется в энергию электрических автоколебаний заданной формы, амплитуды и частоты.

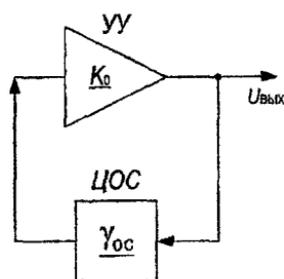


Рисунок 5.4.1 – Обобщенная макромодель генератора

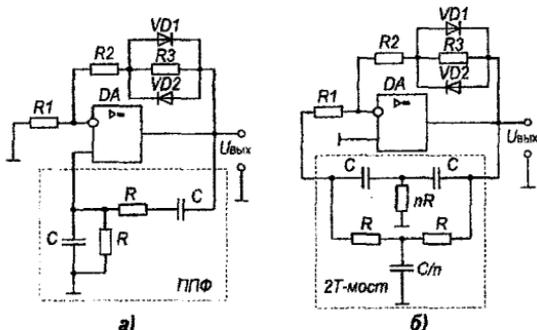


Рисунок 5.4.2 – RC-автогенераторы с мостом Вина (а) и с двойным T-мостом (б)

Обобщенная макромодель генератора приведена на рисунке 5.4.1 и представляет собой усилительное устройство (УУ), охваченное цепью обратной связи (ЦОС).

Для наличия стационарных гармонических колебаний в данной системе необходимо выполнение условия баланса амплитуд (5.4.1) и баланса фаз (5.4.2) только на одной частоте (или в достаточно узком частотном диапазоне):

$$|K_0 \cdot Y_{OC}| = 1, \quad (5.4.1)$$

$$\varphi = \varphi_{УУ} + \varphi_{OC} = 2\pi n, \quad (5.4.2)$$

где K_0 – собственный коэффициент усиления усилителя, Y_{OC} – коэффициент передачи цепи обратной связи (ОС), $\varphi_{УУ}$ и φ_{OC} – фазовые сдвиги, вносимые УУ и цепью ОС соответственно, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ (любое целое число).

Для самовозбуждения генератора и нарастания амплитуды колебаний необходимо, чтобы $K_0 > 1/Y_{OC}$, причём, чем больше K_0 , тем быстрее нарастает амплитуда колебаний. Однако если усилитель является высоколинейным устройством, амплитуда колебаний будет нарастать вплоть до $U_{ВЫХ, max}$ УУ, и выходной сигнал будет иметь значительные нелинейные искажения, т.е. форма выходного сигнала будет существенно отличаться от синусоидальной.

Для снижения нелинейных искажений в схему генератора вводится либо цепь автоматической регулировки усиления, которая поддерживает $K_0 = 1/Y_{OC}$ при амплитуде выходного сигнала, меньшей $U_{ВЫХ, max}$ УУ, либо цепь нелинейной обратной связи.

На рисунках 5.4.2 цепь нелинейной обратной связи реализована на диодах VD1 и VD2, включённых встречно параллельно резистору R_3 .

При малых значениях амплитуды $U_{m Вых}$ выходного сигнала протекающий через резистор R_3 ток I_{R_3} весьма мал, напряжение на диодах $U_{VD} = I_{R_3} R_3$, недостаточно для открытия какого-либо из них, следовательно, коэффициент передачи цепи отрицательной обратной связи (ООС)

$$\gamma_{\text{ООС}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

По мере нарастания амплитуды колебаний увеличивается напряжение на резисторе R_3 и соответственно на диодах $VD1$ и $VD2$. Это приводит к тому, что сопротивление прямосмещенного диода ($VD1$ или $VD2$) начинает уменьшаться, а вместе с этим будет уменьшаться и собственный коэффициент усиления усилителя. По достижении заданной амплитуды $U_{m \text{ Вых}}$ выходного сигнала будет выполняться баланс амплитуд (5.4.1), и коэффициент передачи цепи ООС станет равным

$$\gamma_{\text{ООС}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_{\text{ЭФФ}}},$$

где $R_{\text{ЭФФ}}$ – это сопротивление участка цепи с резистором R_3 и диодами $VD1$, $VD2$. Значение этого сопротивления можно найти по формуле

$$R_{\text{ЭФФ}} = \frac{U_{VD}}{I_{R_1}},$$

где U_{VD} – напряжение на открытом диоде, I_{R_1} – ток, протекающий через резистор R_1 .

На рисунке 5.4.2, а представлена схема -генератора на ОУ с мостом Вина. В этой схеме ООС обеспечивается омическим делителем напряжения $R_1 - R_2 - R_3$. В цепь положительной обратной связи (ПОС) включена избирательная частотно зависимая цепь (полосовой пропускающий фильтр (ППФ)), с помощью которой обеспечивают необходимую частоту генерации $f_T = 1/(2\pi RC)$. На этой частоте фазовый сдвиг $\varphi_{\text{ОС}} = 0$, и выполняется условие баланса фаз (5.4.2). Для выполнения баланса амплитуд (5.4.1) необходимо скомпенсировать затухание, вносимое ППФ на частоте генерации. На этой частоте коэффициент передачи полосового пропускающего фильтра достигает своего максимального значения $\gamma_{\text{ППФ max}} = \gamma_{\text{ОС}} = 1/3$, поэтому собственный коэффициент усиления усилителя должен быть

$$K_0 \approx \frac{R_1 + R_2 + R_{\text{ЭФФ}}}{R_1} = \frac{1}{\gamma_{\text{ОС}}} = 3.$$

На рисунке 5.4.2, б представлена схема -генератора на ОУ с двойным Т-образным мостом (2Т-мост, или 2ТМ), включённым в цепь ООС.

В данной схеме усилитель на ОУ является инвертирующим, поэтому вносимый им фазовый сдвиг $\varphi_{\text{УС}} = 180^\circ$. Для выполнения баланса фаз (5.4.2) на частоте генерации $f_T = 1/(2\pi RC)$ необходимо, чтобы 2Т-мост обеспечивал дополнительный сдвиг по фазе $\varphi_{\text{ОС}} = \varphi_{2\text{ТМ}} = 180^\circ$, создавая тем самым положительную обратную связь. Этого можно добиться выбором значения коэффициента пропорциональности n (см. рис. 5.4.2, б) между значениями ёмкостей и сопротивлений используемых в 2Т-мосте конденсаторов и резисторов. Требуемое условие выполняется при $n < 0,5$, а при $n \approx 0,207$, коэффициент передачи 2Т-моста $\gamma_{2\text{ТМ}} = (2n^2 - n)/(1 + n + 2n^2)$, достигает своего максимального значения: $\gamma_{2\text{ТМ max}} = \gamma_{\text{ОС}} \approx -1/10,7$. Для выполнения баланса амплитуд (5.4.1) собственный коэффициент усиления усилителя должен быть

$$K_0 \approx -\frac{R_2 + R_{\text{ЭФФ}}}{R_1} = \frac{1}{\gamma_{\text{OC}}} = -10,7.$$

При известных значениях частоты генерации f_T и выходного напряжения $U_{m \text{ Вых}}$ рекомендуется следующий порядок расчёта генераторов, показанных на рисунке 5.4.2.

- Для генератора с мостом Вина (рис. 5.4.2, а):
 - задаётся значение сопротивлений резисторов ППФ $R = (3 \dots 10)$ кОм;
 - рассчитывается ёмкость конденсаторов $C = 1/2\pi f_T R$;
 - задаётся $K_0 = 3,2 \dots 4$;
 - задаётся сопротивление резистора $R_1 = (10 \dots 30)$ кОм;
 - после этого рассчитываются сопротивления резисторов R_2, R_3 :

$$R_2 = \frac{R_1}{0,34} \left(0,66 - \frac{(0,5 \dots 0,6) \text{ В}}{U_{m \text{ Вых}}} \right); \quad R_3 = (K_0 - 1) R_1 - R_2.$$

- Для генератора с двойным Т-образным мостом (рис. 5.4.2, б):
 - задаётся значение сопротивлений резисторов ППФ $R = (1 \dots 2)$ кОм;
 - рассчитывается ёмкость конденсаторов $C = 1/2\pi f_T R$ (принимают $n \approx 0,207$);
 - задаётся $K_0 = 13 \dots 16$;
 - задаётся сопротивление резистора $R_1 = (10 \dots 30) \times R$;
 - после этого рассчитываются сопротивления резисторов R_2, R_3 :

$$R_2 = 10,7 \cdot R_1 \left(1 - \frac{(0,5 \dots 0,6) \text{ В}}{U_{m \text{ Вых}}} \right); \quad R_3 = K_0 R_1 - R_2.$$

Величина сопротивления резистора R_3 влияет на скорость нарастания выходного напряжения, а также на коэффициент нелинейных искажений.

Если полученное значение выходного напряжения $U_{m \text{ Вых}}$ отличается от заданного, следует откорректировать сопротивление резистора R_1 или резистора R_2 . Обычно, в целях корректировки амплитуды выходного напряжения последовательно с каким-либо из этих резисторов включают подстроечный резистор.

5.5 Методика расчета пластинчатых радиаторов

Исходными данными для расчета радиатора должны быть: тип полупроводникового прибора (ПП) или интегральной микросхемы (ИМС), его максимальная рассеиваемая мощность P_{max} , предельно допустимая температура $p - n$ -перехода $T_{\text{П}}$, предельно допустимая температура корпуса T_K , тепловое сопротивление между переходом и корпусом $R_{\text{П-К}}$, тепловое сопротивление между переходом и средой $R_{\text{П-С}}$, максимально допустимая температура окружающей среды $T_{C,max}$ (или температура корпуса прибора), установочные размеры ПП или ИМС и способ охлаждения (естественное, конвекция, принудительный обдув и т.д.).

Рекомендуется следующая последовательность расчета радиатора:

- 1) По справочнику находят $P_{max}, T_{\text{П}}, T_K, R_{\text{П-К}}, R_{\text{П-С}}, T_{C,max}$.
- 2) Выбирается материал и удельное тепловое сопротивление $R_{уд}$ пасты (клея) по таблице И.1 приложения И.
- 3) Из справочников по транзисторам, диодам или ИМС находится площадь основания $S_{\text{осн}}$. ПП или ИМС под пасту, например, для основания круглой формы:

$$S_{\text{осн.}} = \pi R^2 = 3,14 \cdot \left(\frac{D_{\text{осн.}}}{2}\right)^2 \cdot 10^{-6} \text{ м,}$$

где $D_{\text{осн.}}$ – диаметр основания ПП или ИМС берётся в миллиметрах.

4) Определяется тепловое сопротивление пасты (клея):

$$R_{\text{пасты}} = \frac{R_{\text{уд.}}}{S_{\text{осн.}}},$$

где $R_{\text{пасты}}$ – тепловое сопротивление между пастой (клеем) и радиатором.

5) Выбирается высота пластины L (приложение И, рисунок И.1, а).

6) По графику (рисунок И.2 приложения И) для заданной высоты L определяется коэффициент неравномерности температуры пластинчатого радиатора q .

7) Определяется допустимая средняя поверхностная температура радиатора $T_{\text{р.доп.}}$ и его перегрев $\Delta T_{\text{р}}$:

$$T_{\text{р.доп.}} = q(T_{\text{п}} - P_{\text{max}}(R_{\text{п-к}} + R_{\text{пасты}}));$$

$$\Delta T_{\text{р}} = T_{\text{р.доп.}} - T_{\text{с.мах.}}$$

8) Для вертикально ориентированной поверхности радиатора высотой L определяется коэффициент теплообмена при естественной конвекции

$$\alpha_{\text{конв.}} = A \left(\frac{\Delta T_{\text{р}}}{L}\right)^{\frac{1}{4}},$$

где A – коэффициент, определяемый по таблице И.2 приложения И.

9) Определяется коэффициент теплообмена $\alpha_{\text{изл.}}$ излучением по формуле:

$$\alpha_{\text{изл.}} = \varepsilon_{\text{рад.}} \varphi_{\text{рад.}} f(T_{\text{р.доп.}}, T_{\text{с.мах.}}),$$

где – $\varepsilon_{\text{рад.}}$ – степень черноты поверхности выбранного материала радиатора, обращенной в окружающую среду, определяется по таблице И.3;

– $\varphi_{\text{рад.}}$ – функция облученности поверхности радиатора, обращенной в окружающую среду (для теплопередачи в неограниченную среду $\varphi_{\text{рад.}} = 1$);

– $f(T_{\text{р.доп.}}, T_{\text{с.мах.}})$ – функция градиента температур между $T_{\text{р.доп.}}$ и $T_{\text{с.мах.}}$, значение которой определяется по таблице И.5, в которой $T_1 = T_{\text{р.доп.}}$; $T_2 = T_{\text{с.мах.}}$.

10) Находится суммарный коэффициент теплообмена

$$\alpha = \alpha_{\text{конв.}} + \alpha_{\text{изл.}}$$

11) Определяется площадь теплоотдающей поверхности радиатора

$$S_{\text{р}} = \frac{P_{\text{мах.}}}{\alpha \Delta T_{\text{р}}}$$

12) В соответствии с таблицей И.4 задаётся толщина пластины δ .

13) Определяется ширина пластины:

$$B = \frac{S_{\text{р}} - 2 L \delta}{2 (L + \delta)}$$

В результате расчета получают размеры пластинчатого радиатора:

$$L \times B \times \delta.$$

Рекомендуемая литература

Основная литература

1. Гусев, В.Г. Электроника и микропроцессорная техника: учебник / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – М.: КНОРУС, 2013. – 800 с.
2. Ровдо, А.А. Схемотехника усилительных каскадов на биполярных транзисторах / А.А. Ровдо. – М.: Издательский дом «Додэка XXI», 2008. – 256 с.
3. Ткаченко, Ф.А. Электронные приборы и устройства: учебник для студ. вузов / Ф.А. Ткаченко. – Минск; М.: Новое знание: ИНФРА-М, 2011. – 682 с.
4. Валенко, В.С. Электроника и микросхемотехника / В.С. Валенко, М.С. Хандогин. – Минск: Бестпринт, 2003. – 320 с.
5. Бойко, В.И. Схемотехника электронных систем. Аналоговые и импульсные устройства / В.И. Бойко, А.Н. Гуржий, В.Я. Жуйков, А.А. Зори, В.М. Спивак. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – с 496.
6. Павлов, В. Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств : Учебник для вузов / В. Н. Павлов, В. Н. Ногин. – 2-е изд., испр. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2001. – 320 с.
7. Опадчий, Ю.Ф. Аналоговая и цифровая электроника : Учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гурув. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 768 с.
8. Изьюрова, Г.И. Расчет электронных схем. Примеры и задачи : Учеб. пособие для вузов по спец. электрон. техники / Г.И. Изьюрова, Г.В. Королев, В.А. Терехов, М.А. Ожогин, В.Н. Серов. – М.: Высш. школа, 1987. – 335 с.
9. Усатенко, С.Т. Выполнение электрических схем по ЕСКД : Справочник / С.Т. Усатенко, Т.К. Каченюк, М.В. Терехова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство стандартов, 1992.

Дополнительная литература

10. Наундорф, У. Аналоговая электроника. Основы, расчет, моделирование/ Уве Наундорф. – М.: Техносфера, 2008. – 472 с.
11. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника. Том I. / У. Титце, К.Шенк; пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 832 с..
12. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника. Том II. / У. Титце, К.Шенк; пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 942 с..
13. Хоровиц, П. Искусство схемотехники. / П. Хоровиц, У. Хилл; пер. с англ. Б. Н. Бронин [и др.]; – М.: Мир, 2001. – 704 с.
14. Прянишников, В.А. Электроника : курс лекций / В.А. Прянишников. – СПб.: Корона принт, 2004. 416 с.
15. Волович, Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Г.И. Волович. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005. – 528 с.
16. Амелина, М.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10 / М.А. Амелина, С.А. Амелин. – Смоленск: Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2013. – 618 с.
17. Галкин, В.И. Полупроводниковые приборы: транзисторы широкого применения: Справочник / В.И. Галкин, А.Л. Булычев, П.М. Лямин. – Минск: Беларусь, 1995. – 383 с.

Приложение А
(Справочное)
Пример оформления реферата

Реферат

Курсовая работа содержит ___ с., ___ рис., ___ табл., ___ источников, ___ прил., ___ л. графического материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: избирательный усилитель, усилитель мощности, операционный усилитель, биполярный транзистор, амплитудно-частотная характеристика, добротность.

Разработан избирательный усилитель с полосой рабочих частот $\Delta f = \dots$ кГц; добротностью $Q = \dots$; мощностью $P_H = \dots$ Вт, отдаваемой в нагрузку сопротивлением $R_H = \dots$. Проведено макетирование и испытание избирательного усилителя (протокол испытаний прилагается). Разработана печатная плата избирательного усилителя.

Курсовая работа выполнена с использованием текстового редактора ..., схемы электрические принципиальные и печатные платы выполнены с помощью Исследование параметров и характеристик избирательного усилителя проводилось с помощью

Приложение Б
(Обязательное)
Основные надписи пояснительной записки курсовой работы

| | | | | | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---|---------------------|-----------------|---------------|
| | | | | | 1-36 04 02.ПЭ-10.КР.ЭЗ | | | |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> | Усилитель антилогарифмический Схема электрическая принципиальная | <i>Лит.</i> | <i>Масса</i> | <i>Масшт.</i> |
| Разраб. | | Иванов И.И. | | | | у | | |
| Руков. | | Петров П.П. | | | | <i>Лист 1</i> | <i>Листов 1</i> | |
| Консульт. | | | | | | БрГТУ, АТПиП | | |
| Н. Контр. | | | | | | | | |
| Утв. | | | | | | | | |

а) основная надпись (форма 1) первого листа чертежей и схем

| | | | | | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-------------------------------|---------------------|-------------|---------------|
| | | | | | 1-36 04 02.ПЭ-10.КР.ПЗ | | | |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> | Пояснительная записка | <i>Лит.</i> | <i>Лист</i> | <i>Листов</i> |
| Разраб. | | Иванов И.И. | | | | | 1 | 28 |
| Руков. | | Петров П.П. | | | | БрГТУ, АТПиП | | |
| Консульт. | | | | | | | | |
| Н. Контр. | | | | | | | | |
| Утв. | | | | | | | | |

б) основная надпись (форма 2) первый лист текстового документа

| | | | | | | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|--------------------------------|--|--|--|-------------|
| | | | | | 1-36 04 02.ПЭ-10.КР.ПЗЗ | | | | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> | | | | | 2 |

в) основная надпись (форма 2а) второй и последующие листы чертежей и схем

| | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|-------------|
| | | | | | | | | <i>Лист</i> |
| | | | | | | | | 2 |

г) второй и последующие листы текстового документа (пояснительной записки)

Приложение В
(Справочное)
Условные графические обозначения в схемах

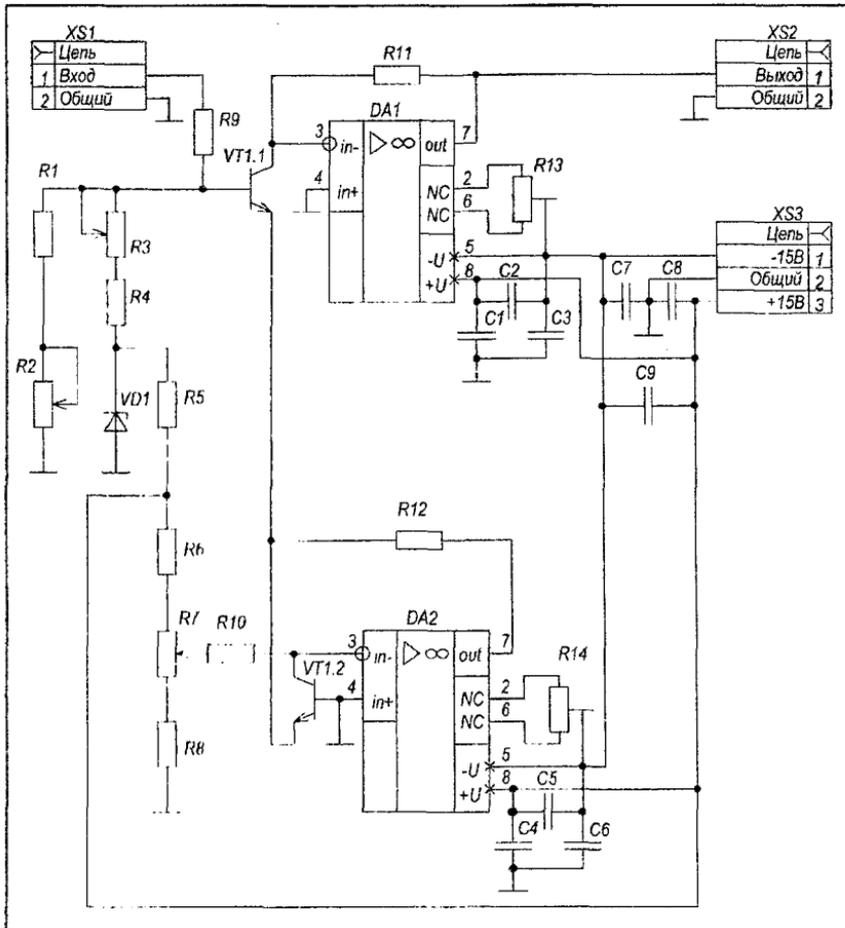
| | | | |
|--|--|---|---|
| <p>Резистор постоянный</p> | <p>Резистор постоянный</p> | <p>Резистор переменный</p> | <p>Резистор переменный двояный</p> |
| <p>Резистор подстроечный</p> | <p>Резисторы нелинейные: терморезистор и варистор</p> | <p>Конденсатор постоянной емкости</p> | <p>Конденсаторы оксидные полярный и неполярный</p> |
| <p>Конденсатор подстроечный</p> | <p>Конденсатор переменной емкости (КПЕ)</p> | <p>Катушка индуктивности, дроссель (L3 - с отводами)</p> | <p>Катушка, дроссель с магнитопроводом (L7 - с медным)</p> |
| <p>Трансформатор с тремя обмотками и электростатическим экраном</p> | <p>Диод, диодный мост</p> | <p>Стабилизатор (VD8 - двуханодный)</p> | <p>Диод Шоттки (VD9), ограничительный (VD10), варикап (VD11)</p> |
| <p>Динистор (VS1), тринистор (VS2, VS3), симистор (VS4)</p> | <p>Транзистор p-n-p</p> | <p>Транзистор n-p-n</p> | <p>Транзистор однопереходный</p> |

Приложение В (Продолжение)

| | | | |
|---|---|---|--|
| <p>Транзистор полевой с р-каналом</p> <p>VT7 VT8</p> | <p>Транзистор полевой с изолированным затвором и р-каналом</p> <p>VT9 Вывод подложки VT10</p> | <p>Транзистор полевой с двумя изолированными затворами и п-каналом</p> <p>VT11</p> | <p>Фоторезистор</p> <p>R20 R19</p> |
| <p>Фото- и светодиод</p> <p>VD13 HL1 VD14 HL2</p> | <p>Фототранзистор</p> <p>VT12 VT13</p> | <p>Оптрон резисторный</p> <p>R6 U1</p> | <p>Оптрон диодный</p> <p>U2 U2.1 U2.2</p> |
| <p>Оптрон тиристорный</p> <p>U3</p> | <p>Оптрон транзисторный</p> <p>U4 U5</p> | <p>Усилитель операционный</p> <p>DA1</p> | <p>Элементы логические</p> <p>DD1.1 DD2.1 DD3.1 DD4.1</p> |
| <p>Элементы логические</p> <p>DD5.1 DD6.1 DD7.1</p> | <p>D-триггер</p> <p>DD8.1</p> | <p>Штырь и гнездо разъёмного соединителя (XW1-XW4 - коаксиального)</p> <p>XP1 XS1 XW1 XW3 XW2 XW4</p> | <p>Вилка и розетка разъёмного соединителя</p> <p>XP1 XS1 X1 X2</p> |
| <p>Контакты разборного и неразборного соединений</p> <p>XT1 XT2 XT3 XT4</p> | <p>Ответвления линий электрической связи</p> | <p>Элемент гальванический, аккумуляторный, батарея элементов</p> <p>G1 GB1 9B</p> | <p>Соединение с общим проводом (корпусом), заземление</p> <p>T</p> |

Приложение Г
(Справочное)

Пример оформления схемы электрической принципиальной



| | | | | | | | | |
|-----------|-------------|----------|---------|------------------------|--|----------|-------|--------|
| | | | | 1-36 04 02.ПЭ-10.КР.ЭЗ | | | | |
| Изм. | Лист | № док-м. | Подпись | Дата | Усилитель антилогарифмический Схема электрическая принципиальная | Лит. | Масса | Масшт. |
| Разраб. | Иванов И.И. | | | | | у | | |
| Руков. | Петров П.П. | | | | Лист 1 | Листов 1 | | |
| Т. контр. | | | | | БрГТУ, АТПИП | | | |
| Н. Контр. | | | | | | | | |
| Утв. | | | | | | | | |

Приложение Д
(Справочное)

Пример оформления схемы электрической принципиальной

| Поз. обозн. | Наименование | Кол | Примечание |
|--|--|----------|------------|
| | <i>Конденсаторы</i> | | |
| С1...С9 | <i>K10-496 - 47нФ ±20% 50В ГОСТ 5.621-70</i> | 9 | |
| | <i>Микросхемы</i> | | |
| DA1,DA2 | <i>K140УД8 ГОСТ 25703-85</i> | 2 | |
| | <i>Резисторы</i> | | |
| R1 | <i>МЛТ-0.125-150Ом ±10% ОЖО 467.180 ТУ</i> | 1 | |
| R2 | <i>СПЗ-16а 100Ом ±20% ОЖО467.072 ТУ</i> | 1 | |
| VD1 | <i>Стабилитрон КС147А СМЗ.362.812 ТУ</i> | 1 | |
| 1-36 04 02.ПЭ-10.КР.ПЭЗ | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись |
| Разраб. Ручев Инженер И.И. | Исполн. Петров П.П. | | |
| М. Констр. Уста | | | |
| Усилитель антилогарифмический Перечень элементов | | | |
| | | Лист | Всего |
| | | 1 | 2 |
| БрГТУ, АТПиП | | | |

Рисунок Д.1 –Первый лист перечня элементов

| Поз. обозн. | Наименование | Кол | Примечание |
|-------------------------|--|----------|------------|
| VT | <i>Транзистор K159HT1 ЖКЗ.365.187 ТУ</i> | 1 | |
| | <i>Разъёмы</i> | | |
| XS1,XS2 | <i>Розетка ОНп-КГ-26 - 2 ГОСТ 14343-81</i> | 2 | |
| 1-36 04 02.ПЭ-10.КР.ПЭЗ | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись |
| | | | |
| | | | Лист |
| | | | 2 |

Рисунок Д.2 –Второй (и последующие) лист перечня элементов

Приложение Ж

(Справочное)

Ряд E24 номинальных значений сопротивлений резисторов и ёмкостей конденсаторов

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| E24 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,5 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,2 | 2,4 | 2,7 | 3,0 |
| | 3,3 | 3,6 | 3,9 | 4,3 | 4,7 | 5,1 | 5,6 | 6,2 | 6,8 | 7,5 | 8,2 | 9,1 |

Номинальные значения сопротивлений (ёмкостей) соответствуют числам в приведённой таблице или числам, полученным умножением или делением этих чисел на 10^n , где n – целое положительное или отрицательное число.

Например, если в результате расчётов получены следующие значения:

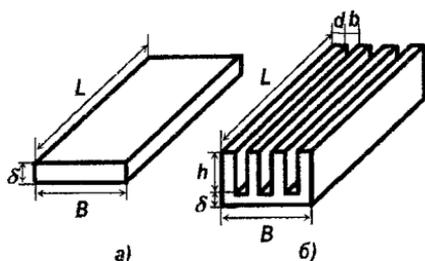
$R = 315 \text{ Ом}$ – принимаем $R = 300 \text{ Ом}$ (E24), либо $R = 330 \text{ Ом}$ (E24);

$R = 9685 \text{ Ом}$ – принимаем $R = 9,1 \text{ кОм}$ (E24), либо $R = 10 \text{ кОм}$ (E24);

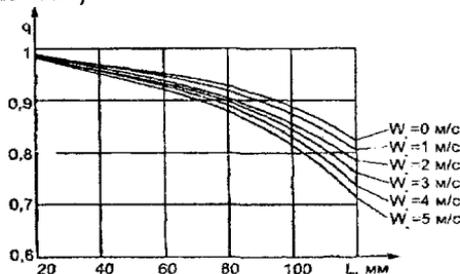
$C = 0,487 \text{ мкФ}$ – принимаем $C = 0,47 \text{ мкФ}$ (E24), либо $C = 0,51 \text{ мкФ}$ (E24).

Выбор того или иного номинального значения обусловлен местом включения резистора или конденсатора в схему электронного устройства. Как правило, если резисторы включены последовательно (например, в делителе напряжения), то значения их сопротивлений принимают либо большими, либо меньшими одновременно. Значения ёмкостей конденсаторов в усилительных каскадах чаще всего выбирают большими.

Приложение И (Справочное)



**Рисунок И.1 Радиаторы
воздушного охлаждения:
пластинчатый (а); ребристый (б)**



**Рисунок И.2 Зависимость коэффициента q от
определяющего размера L и скорости потока
воздуха W_B для пластинчатого радиатора**

Таблица И.1 – Удельное тепловое сопротивление электроизоляционных прокладок

| Материал прокладки | Толщина прокладки δ , мкм | Удельное тепловое сопротивление, |
|---|----------------------------------|------------------------------------|
| | | $R_{уд}, 10^{-4} K \cdot m^2 / BT$ |
| Без прокладки | – | 1,14...1,52 |
| Без прокладки, с пастой КПТ-8 | – | 0,38...0,76 |
| Без прокладки со смазкой ЦИАТИМ | – | 1,14...1,33 |
| Без прокладки, поверхность теплоотвода оксидирована, покрытие лаком УР-231 | – | 6,85 |
| Без прокладки, поверхность теплоотвода оксидирована, лакокрасочное покрытие | – | 7,0 |
| Без прокладки, со смазкой ПМС-200 | – | 1,14 |
| Слюда двухслойная (2-30), (2-25), (2-20), (2-15) без пасты | 60, 50, 40, 30 | 3,23; 2,39; 2,24; 1,98 |
| Слюда двухслойная с пастой КПТ-8 между всеми контактными поверхностями | 60, 50, 40, 30 | 1,52; 1,14; 1,03; 0,83 |
| Капроновая сетка с пастой КПТ-8 | 35, 150 | 9,12; 7,5 |
| Лавсановая сетка | <10 | 4,34 |
| Лавсановая сетка с пастой КПТ-8 | 200 | 7,98 |
| Алюминиевая прокладка глубоко оксидированная: | | |
| без пасты | 1000 | 8,75 |
| с пастой КПТ-8 | 1000 | 3,42 |
| Триацетатная пленка с пастой КПТ-8 | 50 | 2,85 |

Таблица И.2 – Значения коэффициента А для воздуха

| $\Delta T_p, ^\circ C$ | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 150 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| $A, BT \cdot ^\circ C^{-5/4} \cdot M^{-7/4}$ | 1,42 | 1,40 | 1,38 | 1,36 | 1,34 | 1,31 | 1,29 | 1,27 | 1,26 | 1,25 | 1,245 |

Приложение И (Продолжение)

Таблица И.3 – Степень черноты различных поверхностей, ϵ

| Материал | ϵ | Материал | ϵ |
|---|-------------|--|------------|
| Алюминий полированный | 0,04–0,06 | Никель окисленный при 600°C | 0,37–0,48 |
| Алюминий сильно окисленный | 0,2–0,31 | Окись никеля | 0,59–0,86 |
| Алюминиевая фольга (без масла) | 0,09 | Титан | 0,63 |
| Дюралюминий Д16 | 0,37–0,41 | Краски эмаливые, лаки различных цветов | 0,92 |
| Силуминовое литье (в песчаной форме) | 0,31–0,33 | Краски матовые различных цветов | 0,92–0,96 |
| Силуминовое литье (в кокильной форме) | 0,16–0,22 | Лак черный матовый | 0,96–0,98 |
| Анодированные алюминиевые сплавы для радиаторов | $\geq 0,85$ | Краска защитно-зеленая | 0,9 |
| Сталь полированная | 0,066 | Краска бронзовая | 0,51 |
| Сталь сильно окисленная | 0,8–0,82 | Краска алюминиевая | 0,28 |
| Латунь прокатанная | 0,06 | Окись металлов | 0,4–0,8 |
| Латунь тусклая | 0,22 | Золото | 0,1 |
| Медь окисленная | 0,6 | Золото тщательно полированное | 0,02–0,03 |
| Медь полированная | 0,03 | Стекло | 0,91–0,94 |
| Окись магния | 0,2 | Резина твердая | 0,95 |
| Никель технический чистый полированный | 0,07–0,09 | Резина мягкая, шероховатая | 0,86 |

Таблица И.4 Рекомендации по выбору материалов

| Тип радиатора и условия теплообмена | Рассеиваемость, Вт | Размеры радиатора, 10^{-3} м | | | | Примечание (рекомендации) |
|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------|-------------------|-------------------|---|
| | | Толщина основания | Высота ребер | Размеры основания | Шаг между ребрами | |
| Пластиноччатый радиатор | | | | | | |
| естественная конвекция | до 5 | 3–1 | – | до 100×100 | – | Основание целесообразно делать квадратным |
| Ребристый радиатор | | | | | | |
| естественная конвекция | 5–20 | 3–6 | 8–32 | до 150×150 | 8–14 | Толщина ребра не более 1–2 мм |
| вынужденная конвекция | до 100 | 3–6 | 8–32 | до 150×150 | 4–6 | |

Приложение И. (Продолжение)

Таблица И.5 – Значения функции $f(T_1, T_2)$

| T_1 , °C | T_2 , °C | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| 10 | 5,03 | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 5,16 | 5,32 | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 5,31 | 5,45 | 5,59 | | | | | | | | | | | | |
| 25 | 5,45 | 5,59 | 5,76 | 5,90 | | | | | | | | | | | |
| 30 | 5,59 | 5,76 | 5,90 | 6,05 | 6,20 | | | | | | | | | | |
| 35 | 5,76 | 5,90 | 6,05 | 6,20 | 6,35 | 6,51 | | | | | | | | | |
| 40 | 5,90 | 6,06 | 6,20 | 6,35 | 6,51 | 6,60 | 6,82 | | | | | | | | |
| 45 | 6,05 | 6,20 | 6,35 | 6,51 | 6,66 | 6,83 | 7,00 | 7,14 | | | | | | | |
| 50 | 6,20 | 6,35 | 6,51 | 6,67 | 6,83 | 7,00 | 7,17 | 7,35 | 7,50 | | | | | | |
| 60 | 6,65 | 6,70 | 6,87 | 7,04 | 7,19 | 7,35 | 7,51 | 7,69 | 7,87 | 8,05 | | | | | |
| 70 | 6,90 | 7,06 | 7,21 | 7,39 | 7,55 | 7,72 | 7,86 | 8,05 | 8,24 | 8,42 | 8,80 | | | | |
| 80 | 7,27 | 7,44 | 7,59 | 7,75 | 7,80 | 8,07 | 8,26 | 8,45 | 8,65 | 8,83 | 9,20 | 9,62 | | | |
| 90 | 7,63 | 7,82 | 7,98 | 8,13 | 8,31 | 8,49 | 8,67 | 8,86 | 9,04 | 9,25 | 9,65 | 10,03 | 10,46 | | |
| 100 | 8,03 | 8,19 | 8,37 | 8,53 | 8,72 | 8,91 | 9,09 | 9,28 | 9,46 | 9,66 | 10,08 | 10,49 | 11,91 | 11,36 | |
| 110 | 8,43 | 8,60 | 8,79 | 8,97 | 9,15 | 9,33 | 9,51 | 9,71 | 9,90 | 10,10 | 10,51 | 10,93 | 11,38 | 11,82 | 12,30 |
| 120 | 8,85 | 9,02 | 9,20 | 9,40 | 9,56 | 9,77 | 9,98 | 10,17 | 10,35 | 10,56 | 11,01 | 11,42 | 11,87 | 12,31 | 12,80 |
| 130 | 9,30 | 9,49 | 9,65 | 9,88 | 10,01 | 10,22 | 10,41 | 10,62 | 10,81 | 11,02 | 11,42 | 11,90 | 12,37 | 12,87 | 13,32 |
| 140 | 9,75 | 9,95 | 10,12 | 10,30 | 10,50 | 10,72 | 10,90 | 11,10 | 11,31 | 11,51 | 11,94 | 12,4 | 12,89 | 13,40 | 13,85 |
| 150 | 10,20 | 10,39 | 10,57 | 10,77 | 10,96 | 11,16 | 11,37 | 11,57 | 11,79 | 12,00 | 12,44 | 12,90 | 13,38 | 13,87 | 14,38 |

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 3 |
| 1 ТЕМАТИКА КУРСОВОЙ РАБОТЫ..... | 3 |
| 2 СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ | 3 |
| 3 СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ..... | 4 |
| 3.1 Реферат | 4 |
| 3.2 Содержание | 4 |
| 3.3 Введение | 4 |
| 3.4 Основная часть | 4 |
| 3.5 Заключение | 5 |
| 3.6 Приложения | 5 |
| 4 ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ..... | 5 |
| 4.1 Оформление пояснительной записки | 5 |
| 4.2 Оформление графической части..... | 6 |
| 4.3 Список использованных источников | 7 |
| 5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ..... | 8 |
| 5.1 Расчет оконечного каскада..... | 9 |
| 5.2 Избирательные усилители | 12 |
| 5.3 Активные фильтры..... | 14 |
| 5.4 Генераторы колебаний | 16 |
| 5.5 Методика расчета пластинчатых радиаторов | 18 |
| Рекомендуемая литература | 20 |
| Приложение А | 21 |
| Приложение Б | 22 |
| Приложение В | 23 |
| Приложение Г | 25 |
| Приложение Д | 26 |
| Приложение Ж | 27 |
| Приложение И | 28 |

Учебное издание

Составитель:
Смаль Александр Сергеевич

СХЕМОТЕХНИКА АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ

Методические указания
к выполнению курсовой работы
для студентов специальности
1 – 36 04 02 «Промышленная электроника»

*Текст печатается в авторской редакции,
орфографии и пунктуации*

Ответственный за выпуск: Смаль А.С.
Редактор: Боровикова Е.А.
Компьютерная вёрстка: Соколюк А.П.

Подписано в печать 29.10.2020 г. Формат 60x84 1/16. Бумага «Performer».
Гарнитура «Arial Narrow». Усл. печ. л. 1,86. Уч. изд. л. 2,0. Заказ № 1006. Тираж 20 экз.
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.