

Южно-Уральский государственный университет  
Кафедра электронных вычислительных машин

УДК 621.382(07)

В. В. Лурье, А. Н. Пустыгин

# ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие по курсовому проектированию

Челябинск  
2002

УДК 621.382(07)

В.В.Лурье, А.Н.Пустыгин.

**ЭЛЕКТРОНИКА**

Учебное пособие по курсовому проектированию

В учебном пособии рассматриваются методические и схемотехнические аспекты проектирования различных узлов радиоэлектронной аппаратуры. Особое внимание уделено инженерному подходу к проектированию электронных схем и выработке самостоятельного навыка количественного анализа их свойств.

Пособие предназначено для студентов приборостроительных специальностей.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Авторы учебного пособия – разработчики радиоэлектронной аппаратуры различного профиля (средства вычислительной техники, устройства автоматики, радиотехнические устройства) в течение последних 15 лет преподавали ряд аппаратных дисциплин студентам специальности 2201 (Вычислительные сети, комплексы и системы) на кафедре ЭВМ Южно-Уральского государственного университета. Имеющийся у авторов опыт общения со студентами этой и некоторых других специальностей приборостроительного цикла позволяет сделать вывод: несмотря на то, что всем студентам-приборостроителям читаются «общеобразовательные» курсы электроники, за печально малым исключением они не владеют своей второй, молчаливо подразумеваемой специальностью «инженер-электронщик широкого профиля» на уровне, достаточном для практического ее применения. Причина, как правило, не в недостатке конкретных сведений из области электронных приборов или схемотехники, а скорее в отсутствии навыка их использования. Навык же может появиться только в процессе профессиональной деятельности инженера-электронщика, которую будущие специалисты в области вычислительной техники, осознавая недостаточность своей подготовки, как правило, избегают. Таким образом возникает порочный круг.

Курсовой проект «Электроника» – попытка выйти за пределы этого круга, провести студента по основным этапам практической инженерной разработки.

Используемый методический подход может быть с успехом применен в иных сферах инженерной практики.

## 1. О ПРОЕКТИРОВАНИИ

Впервые литература о методах проектирования появляется в 60-х годах XIX в. До этого времени предполагалось, что проектирование – это то, чем занимаются инженеры, когда создают чертежи (эскизы) для будущего производства.

В настоящее время эта точка зрения считается просто наивной [ 1 ]. Обширная современная литература, посвященная традиционным и нетрадиционным методам проектирования, единая в стремлении выявить сущность проектирования и изложить ее в виде некоторого стандартного метода. В первую очередь поражает обилие формулировок процесса проектирования:

«... отыскание существенных компонентов какой-либо физической структуры»;

«...целенаправленная деятельность по решению задач»;

«... использование научных принципов, технической информации и воображения для определения механической структуры машины или системы, предназначенной для выполнения заранее заданных функций с наибольшей эффективностью»;

«... творческая деятельность, вызывающая к жизни нечто новое и полезное, чего раньше не существовало».

Не подвергая сомнению справедливость каждого из этих определений, авторы, тем не менее, полагают, что суть проектирования применительно к интересующей нас профессиональной сфере наиболее точно выражает определение А. Азимова:

«...принятие решений в условиях неопределенности с тяжелыми последствиями в случае ошибки».

## 2. О ЦЕЛЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Ключевое понятие традиционной теории проектирования – ДОСТИЖЕНИЕ ЦЕЛИ. При этом предполагается, что с целями, во всяком случае, все ясно, а вся проблема в их достижении. На самом деле не все так просто.

Зададим вместо вопроса «Какова цель проекта?» вопрос «Для чего МЫ занимаемся проектированием?» Приведем простейшие варианты ответов:

**ДЛЯ ТОГО, ЧТОБЫ:**

1. «... разработать документацию для последующего производства технического устройства с заданными параметрами»;

2. «... отчитаться за перечисленные авансом средства на разработку чего-то»;
3. «... заработать на реализации самого проекта (документации) или производимого с ее помощью продукта»;
4. «... продемонстрировать профессиональную состоятельность»;
5. «... изменить мир к лучшему»;
5. «... научиться проектировать подобные продукты» (как вариант – научиться проектировать);
6. «... получить зачет»;
7. «... просто мне это нравится».

Очевидно, что столь разные цели требуют различных путей их достижения (вариант 7 вообще склонен обходиться без понятия «ЦЕЛЬ»).

Процесс проектирования, являясь отражением жизни, отражает в общем случае неоднозначность, неопределенность, а зачастую и противоречивость целеполагания. **ТАК ЧТО ЖЕ ЯВЛЯЕТСЯ ВАШЕЙ ЦЕЛЮ?**

### **3. О МЕТОДАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Обсуждение методологии проектирования с общих позиций явным образом выходит за рамки настоящего пособия. Мы будем рассматривать методы проектирования (как частные, так и общие) применительно к конкретному курсовому проектированию после того, как зададим его рамки (весьма жесткие!). Сделаем некоторые предварительные замечания:

Приведенный в п. 2 пример демонстрирует два важнейших технологических приема процесса проектирования:

**1. ПЕРЕФРАЗИРОВАНИЕ (ПЕРЕФОРМУЛИРОВАНИЕ) задачи.**

**2. РЕФЛЕКСИЯ** – постоянный самоконтроль: «Что именно я делаю, когда делаю что-либо?»

Считается очевидным, что «...проектировщик должен предвидеть конечный результат осуществления своего проекта и определить меры, необходимые для достижения этого результата». На самом же деле это не более чем благие пожелания, ибо, по утверждению А. и Б. Стругацких, в условиях «ограниченного всемогущества» даже боги бессильны. (См. А. и Б. Стругацкие, «Отягощенные Злом»). Но если правильно выб-

рать «рамки ограничений», грамотно избавиться от неоднозначности и противоречивости целеполагания, можно всерьез попытаться контролировать конечный результат.

#### **4. ЦЕЛИ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Курсовой проект «Электроника» предполагает:

- сведение в единую систему знаний, полученных студентами в процессе изучения курсов «ФИЗИКА», «ТОЭ», «ЭЛЕКТРОНИКА»;
- приобретение общих навыков технического проектирования (включая работу со справочной литературой и документирование полученных результатов);
- приобретение навыков проектирования узлов электронной аппаратуры, включая элементы количественного схемотехнического анализа и разработку документации;
- приобретение навыков активной защиты полученного технического решения.

#### **5. ТРЕБОВАНИЯ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ И ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ**

Задача проектирования электронного устройства в общем случае имеет чрезвычайно обширное поле решений; для такого проектирования требуется весьма значительный объем знаний как в области применения проектируемого устройства, так и в области схемотехники и ряда специальных смежных дисциплин. Для того чтобы сузить рамки решаемой задачи, наложим следующие ограничения:

- принципиальная схема устройства задается преподавателем (источником могут служить технические журналы и иная литература);
- краткое описание принципа действия и основные технические параметры устройства прилагаются.

Студенту предлагается разработать функционально-завершенный узел электронной аппаратуры, включающий несколько основных типов электронных компонентов (различные виды диодов, тиристоры, транзисторы биполярные и полевые, микросхемы аналоговые и цифровые (малой или сред-

ней степени интеграции), трансформаторы, реле, индикаторные устройства и т.д.). Разработка включает следующие основные этапы:

1. **ЭСКИЗНЫЙ РАСЧЕТ** устройства на основе заданных основных технических параметров (параметры, не заданные при выдаче задания, выбираются самим проектировщиком, исходя из здравого смысла и назначения устройства).

2. **ОБОСНОВАННЫЙ ВЫБОР** конкретного типа электронных компонентов схемы.

3. **ДЕТАЛЬНЫЙ РАСЧЕТ** принципиальной схемы, включающий определение номиналов всех ее элементов с учетом значений токов и напряжений во всех ветвях и при всех режимах функционирования устройства.

4. **РАЗРАБОТКА ЭСКИЗА** размещения элементов схемы с учетом конкретных размеров и условий функционирования (радиаторы, теплоотводы, элементы крепления, разъемы и т.д., без топологии токопроводящих соединений).

5. **ОПРЕДЕЛЕНИЕ** массогабаритных показателей.

6. **ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ** на основе заданных критериев качества (КПД, коэффициент стабилизации, чувствительность, точность и т.д.). Критерии качества, по которым требуется провести анализ, согласуются с преподавателем.

В силу того, что у студентов, как правило, отсутствуют навыки технического проектирования и сопутствующая «дисциплина мышления», структура пояснительной записки и доклад на защите проекта жестко регламентируются.

## **6. ТРЕБОВАНИЯ К ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКЕ**

Пояснительная записка оформляется в соответствии с требованиями ЕСКД.

Пояснительная записка должна содержать следующие разделы:

1. Подписанный преподавателем лист задания с названием разрабатываемого устройства, указанием источника принципиальной схемы (журнал, книга, схема выдана руководителем и т.д.), основных технических параметров и согласованных с преподавателем критериев качества.

2. Описание принципа действия устройства с приведени-

ем необходимых графических материалов (диаграмм, графиков и т.д.). Степень подробности описания принципа действия определяется проектировщиком (под его ответственность) и должна быть достаточна для его (принципа действия) понимания как исполнителем, так и членами комиссии во время защиты.

3. Эскизный расчет устройства на основе согласованных основных технических параметров.

4. Обоснованный эскизным расчетом (либо иными соображениями) выбор основных электронных компонентов схемы с указанием необходимых справочных параметров выбранных компонентов и источника данных (справочника).

5. Принципиальная схема устройства с указанием типов и выбранных электронных компонентов (выполняется в соответствии с требованиями ЕСКД).

6. Детальный расчет принципиальной схемы с указанием всех номиналов элементов с учетом токов, напряжений, необходимых временных, частотных и динамических параметров во всех цепях и при всех режимах работы устройства, а также графоаналитический (или иной) расчет основных (хотя бы одного) нелинейных элементов схемы. Раздел должен также содержать все необходимые для расчета графические материалы (таблицы, диаграммы). Результаты расчета сводятся в спецификацию (перечень элементов), которая оформляется в соответствии с требованиями ЕСКД.

7. Анализ работы устройства с точки зрения заданных критериев качества.

8. Эскиз размещения элементов и электронных компонентов схемы (выполняется в соответствии с требованиями ЕСКД).

9. Определение основных массогабаритных показателей (На основе эскиза размещения и справочных данных).

10. Перечень использованной литературы.

Общий объем пояснительной записки не должен превышать 25 листов формата А4.

## **7. ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТЕ ПРОЕКТА**

Защита проекта осуществляется в указанные сроки перед комиссией, состав которой утверждается руководителем курсового проектирования.



Курсовой проект, представляемый к защите, должен быть подписан преподавателем и иметь визу нормоконтролера.

Для успешной защиты проекта студент должен продемонстрировать:

- четкое понимание назначения проектируемого устройства, условий его функционирования и принципа действия;
- знание физических основ функционирования электронных компонентов, задействованных в схеме;
- грамотно выполненный эскизный расчет, обоснованный выбор элементов схемы, детальный расчет принципиальной схемы и анализ работы устройства по заданному критерию качества;
- способность производить количественные расчеты и оценки параметров схемы по указанию комиссии, в том числе оценки работы в ситуациях нештатных режимов (обрывы цепей, короткие замыкания и т.д.);
- умение четко и технически грамотно формулировать мысли, выстраивать аргументацию в процессе защиты, отстаивать принятое решение.

**ЗАМЕЧАНИЕ:** категорически не рекомендуется использовать для расчетов «слепые» методики, основанные на взятых из литературных источников формулах. В любом случае требуется понимание физической сути всех используемых расчетных соотношений. В порядке исключения допускается применение готовых расчетных соотношений для оценки параметров сложных физических процессов, однако и в этом случае ответственность за численное значение результата несет разработчик.

Обязательная часть доклада при защите проекта выстраивается по форме:

1. Задание (название, назначение, основные параметры).
2. Функциональный состав устройства.
3. Принцип действия.

Дальнейший ход защиты определяется комиссией.

В случае выявления ошибок проектирования комиссия может предложить устранить недостатки проекта с повторным предъявлением проекта комиссии (без повторной защиты).

В случае выявления ошибок принципиального характера или невыполнении требований п. 7 назначается повторная защита.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ТИПА С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

В качестве исходного материала для курсового проектирования предлагается принципиальная схема рис. 1.

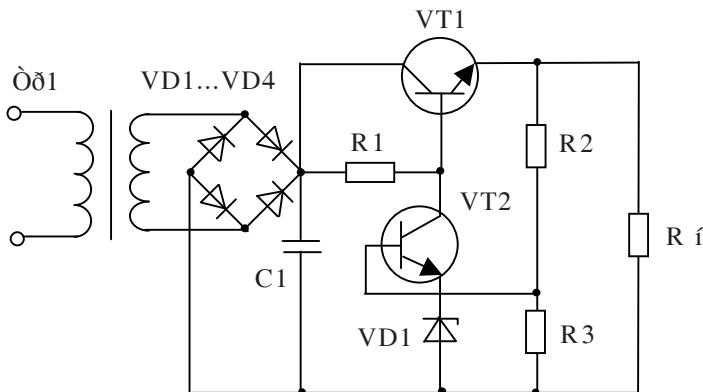


Рис. 1. Компенсационный стабилизатор напряжения последовательного типа с обратной связью

Технические параметры устройства следующие:

Входное питание – бытовая сеть  $220\text{ В}^{+10\%}_{-15\%}$ , 50 Гц,

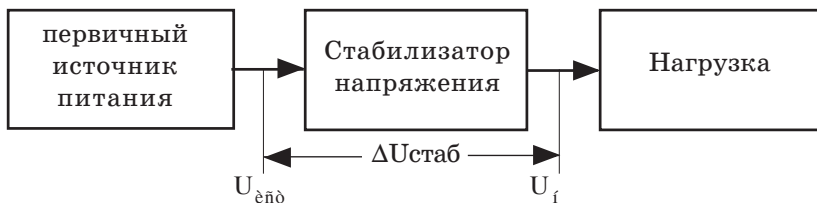
Выходное напряжение 9.0 В при токе не более 1 А.

Устройство предназначено для использования в лабораторных условиях в качестве источника напряжения.

### ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ СОСТАВ УСТРОЙСТВА

Для выяснения функционального состава обратимся к принципу действия устройства.

Итак, в нашем распоряжении первичный источник питания, вырабатывающий постоянное по направлению, но не слишком стабильное по величине напряжение. Первичный источник питания, стабилизатор напряжения и нагрузка включаются последовательно:



Очевидно, что  $U_{\text{ист}} - \Delta U_{\text{стаб}} = U_{\text{н}}$ , поэтому, в принципе, возможно компенсировать любые изменения напряжения источника питания, изменяя падение напряжения  $\Delta U_{\text{стаб}}$  и добиваясь тем самым выполнения условия  $U_{\text{н}} = \text{const}$ .

Общая функциональная схема подобного автоматического регулятора выглядит следующим образом:

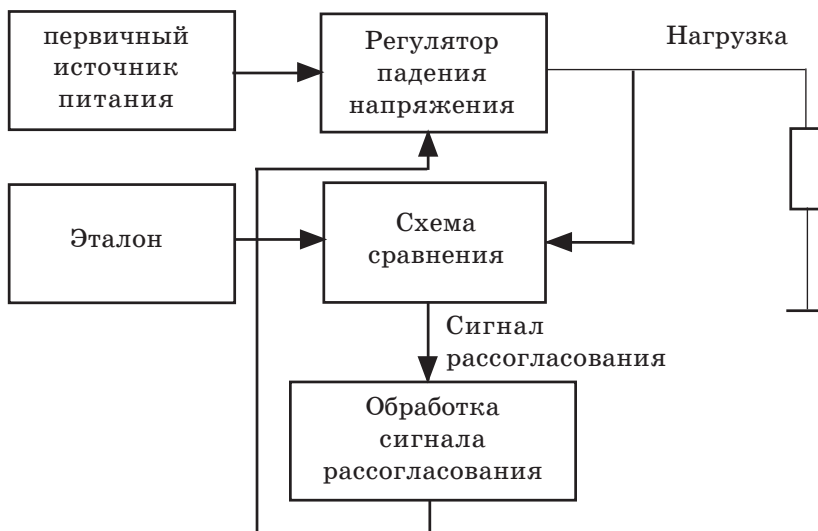


Рис. 2. Функциональная схема автоматического регулятора напряжения

Перечислим функциональные узлы:

- первичный источник питания – двухполупериодный мостовой выпрямитель, реализованный на элементах  $\text{Tr}1$ ,  $\text{VD}1 \dots \text{VD}4$ ,  $\text{C}1$ ;
- регулирующий элемент, реализованный на транзисторном каскаде  $\text{VT}1$  (каскад включен по схеме ОК);

- эталон (источник опорного напряжения) на основе стабилитрона VD5;
- схема сравнения, реализованная на основе транзисторного каскада на транзисторе VT2 (по схеме ОЭ);
- усилитель сигнала рассогласования, реализованный на каскадах VT1 и VT2.

## ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УСТРОЙСТВА

Первичный источник (двухполупериодный выпрямитель) на своем выходе создает пульсирующее с частотой 100 Гц напряжение. Амплитуда пульсаций зависит от величины конденсатора фильтра C1 и тока нагрузки. Уровень напряжения на выходе выпрямителя зависит также от напряжения питающей эл. сети на входе трансформатор Tr1.

Между выпрямителем и нагрузкой включен (в качестве регулятора падения напряжения) участок коллектор-эмиттер транзистора T1. Для того, чтобы иметь возможность управлять падением напряжения, необходимо, чтобы транзистор VT1 находился в активном режиме (ток коллектора VT1 пропорционален управляющему току базы). Током базы транзистора VT1 можно управлять, изменяя ток коллектора транзистора VT2. Очевидно, что VT2 также должен находиться в активном режиме. Протекающий через участок коллектор-эмиттер VT2 ток течет через стабилитрон VD5, являющийся эталоном – источником опорного напряжения и находящимся в области пробоя на обратной ветви ВАХ. Поэтому на эмиттере VT2 формируется весьма стабильное (опорное) напряжение. Напряжение на базу VT2 подается с нагрузки через резистивный делитель R2, R3.

Предположим, что имело место увеличение напряжения на нагрузке. Это приведет к увеличению напряжения между базой и эмиттером VT2 и, следовательно, к уменьшению напряжения на коллекторе VT2 (поскольку VT2 включен по схеме ОЭ и инвертирует на выходе фазу входного сигнала).

Уменьшение напряжения на коллекторе VT2 означает уменьшение напряжения на базе VT1, включенного по схеме ОК (иначе – эмиттерного повторителя). Поэтому напряжение на эмиттере VT1 (то-есть на нагрузке) понизится – вернется в исходное состояние.

Уменьшение напряжения на нагрузке будет отрабатываться схемой в сторону увеличения, то есть налицо отрицательная обратная связь, поддерживающая постоянное значение напряжения на нагрузке.

Основное достоинство этой схемы – напряжение на нагрузке будет удерживаться постоянным независимо от причин, вызывающих его изменения.

## ЭСКИЗНЫЙ РАСЧЕТ УСТРОЙСТВА

Для эскизного расчета очень важен выбор базового элемента, с которого расчет начинается. Выбор базового элемента зависит от конкретной схемы и задачи, поставленной перед проектировщиком.

В нашем примере выбор базового элемента достаточно прост – это наиболее мощный (силовой) элемент схемы, который управляет величиной протекающего в нагрузке тока и за счет этого регулирует напряжение на нагрузке – транзистор VT1.

Критерии выбора транзистора VT1.

**1. Предельно допустимый ток коллектора  $I_{k \max}$**  должен быть по крайней мере на 25...50 % больше максимального тока нагрузки (размер запаса по максимальному току определяется особенностями задачи, и его выбор – компетенция проектировщика). То есть подойдет транзистор, имеющий  $I_{k \max}$  не менее 1,5 А.

**2. Предельно допустимая мощность  $P_{k \max}$** , рассеиваемая на коллекторе транзистора.

Напряжение на эмиттере VT1 равно напряжению нагрузки (9,0 В). Определим, каким может быть максимальное напряжение на коллекторе VT2 в самом неблагоприятном случае.

Для того, чтобы VT1 находился в активном режиме, напряжение между его коллектором и эмиттером должно быть не менее 0,8...1,5 В. Примем за минимально допустимую величину перепад напряжения  $U_{кэVT1 \min} = 1,5$  В.

Поскольку напряжение на коллекторе VT1 пульсирует с частотой 100 Гц на величину  $DU_{\text{выпр}}$ , зададим требуемую величину  $DU_{\text{выпр}} = 2$  В. Выбор этого значения достаточно произволен, определяется опытом и интуицией разработчика и выражает компромисс между уровнем пульсаций и величиной

фильтрующей емкости  $C1$ . Минимальный перепад напряжения  $U_{кэVT1}$  придется увеличить на величину  $\Delta U_{выпр.}$ .

Величина питающего сетевого напряжения 220 В 50 Гц может уменьшиться на 15%. В результате напряжение на выходе выпрямителя будет не  $U_n + U_{кэ_{VT1 \min}} + \Delta U_{выпр.} = 12,5$  В, а на 15 % (~1,9...2 В) ниже, поэтому добавим 2 В и получим рабочее (номинальное) напряжение на коллекторе  $VT1 = 12,5 + 2 = 14,5$  В. Наконец, предусмотрим возможное увеличение сетевого напряжения на 10 %, что приведет к увеличению напряжения на коллекторе  $VT1$  до  $14,5 + 1,4 = 15,9$  В (округлим до 16 В).

Таким образом, максимально возможный перепад напряжений между коллектором и эмиттером  $VT1$  составляет 7.0 В, что при токе 1А дает мощность 7 Вт. Поэтому мощность  $VT2$  должна составлять с учетом запаса не менее 10 Вт.

### 3. Частотный диапазон.

Выбор транзистора по частотному диапазону зависит от тех задач, которые ставятся перед стабилизатором. Если стабилизатор должен работать в условиях помех, имеющих весьма широкий спектр частот (что возможно при подключении к питающей сети по соседству тиристорного регулятора или сварочного аппарата), то регулирующий транзистор  $VT1$  придется выбирать достаточно высокочастотным. Если же учитывать только основной источник помех – сетевую пульсацию (100 Гц), то  $VT1$  может быть низкочастотным. При реальном проектировании придется учитывать также конструктивные особенности корпуса транзистора, удобство его крепления к радиатору, стоимость.

На основании приведенных рассуждений выберем транзистор КТ705 и выпишем в соответствующее место пояснительной записки (с указанием источника) его основные и предельные параметры.

Транзистор КТ705 германиевый сплавной, n-p-n  
усилительный низкочастотный мощный [18]

<i>Постоянный ток коллектора</i>	<i>3,5 А</i>
<i>Постоянная рассеиваемая мощность коллектора</i>	<i>15 Вт</i>
<i>Постоянное напряжение коллектор-эмиттер</i>	<i>20 В</i>
<i>Статический к-т передачи тока в схеме ОЭ</i>	<i>50...100</i>
<i>Обратный ток коллектора не более</i>	<i>0,5 ма</i>

### Выбор транзистора VT2 и стабилитрона VD5.

Транзистор VT2 управляет базовым током транзистора VT1 за счет изменения своего коллекторного тока. В самом деле, напряжение на эмиттере VT1 постоянно и равно 9,0 В, на базе VT1 (коллекторе VT2) приблизительно на лыжу (0,4...0,5 В для германиевого транзистора) больше и равно 9,5 В. Напряжение на выходе выпрямителя пульсирует от 14,5 В до 12,5 В, что не приводит к значительному изменению тока через резистор R1, поэтому в первом приближении будем считать этот ток постоянным. Ток резистора R1 делится между базой VT1 и коллектором VT2. Зная коэффициент передачи тока VT1, определим его базовый ток

$$I_{б\ VT1} = I_{н\ max}/b_{VT1} = 1000/100 = 10\ \text{мА}$$

Чтобы эффективно влиять на величину базового тока VT1, транзистор VT2 должен изменять свой коллекторный ток на такую же по порядку величину, причем минимальный ток коллектора  $I_{к\ VT1}$  должен быть не менее минимального тока стабилизации стабилитрона VD5. Учитывая, что для большинства маломощных стабилитронов этот ток на составляет около 3 мА, выберем коллекторный ток VT2 равным 7 мА.

### Стабилитрон КС 168

Напряжение пробоя стабилитрона задает напряжение на эмиттере VT2. Поскольку VT2 работает в активном режиме, а напряжение на его коллекторе 9,5 В, напряжение пробоя стабилитрона не должно превышать 8,5 В. Выберем стабилитрон КС 168 А с напряжением пробоя 6,8 В. Тогда максимальное напряжение  $U_{кэ\ VT2} = 2,7\ \text{В}$  при токе 7 мА, что позволяет выбрать транзистор КТ 315 А.

Стабилитрон КС 168 А кремниевый двуханодный маломощный [19]

<i>Напряжение стабилизации <math>U_{ст. ном.}</math></i>	<i>6,8 В</i>
<i>Ток стабилизации <math>I_{ст. мин.}</math></i>	<i>1 мА</i>
<i>Максимальная мощность <math>P_{мах}</math></i>	<i>300 мВт</i>
<i>Дифференц. сопротивление <math>G_{ст}</math></i>	<i>7 Ом</i>

Транзистор КТ 315 А кремниевый эпитаксиально-планарный усилительный высокочастотный маломощный [18]

*Постоянное напряжение коллектор-эмиттер*      25 В

*Постоянный ток коллектора*      100 мА

*Постоянная рассеиваемая мощность коллектора* 150 мВт

Расчет резистора R1 очевиден: падение напряжения на нем  $U_{R1} = 14,5 - 9,7 = 4,8$  В, протекающий ток  $I_{R1} = I_{6R1} + I_{kR2} = 10 + 7 = 17$  мА,  $R1 = 282$  Ом.

Резисторы R2 и R3, образующие резистивный делитель, задают постоянное смещение на базе VT2, равное  $6,8 + 0,7 = 7,5$  В.

Для того, чтобы потенциал базы определялся резистивным делителем и практически не зависел от тока базы VT2, нужно задать ток делителя в 10...20 раз больший, чем  $I_{6VT2}$ . Поскольку  $I_{6VT2} = I_{kVT2} / \beta_{VT2} = 100$  мкА, зададим ток делителя R2 / R3 равным 1 мА. Тогда  $R3 = 7,5$  кОм,  $R2 = 1,5$  кОм.

Разумеется, номиналы резисторов выбираются из стандартного ряда и могут отличаться от вычисленных значений.

#### Оценка емкости фильтра C1.

Уровень пульсаций  $\Delta U$  на выходе выпрямителя нами задан на уровне 2.0 В. Оценить требуемую величину емкости фильтра C1 можно из следующих простых соображений.

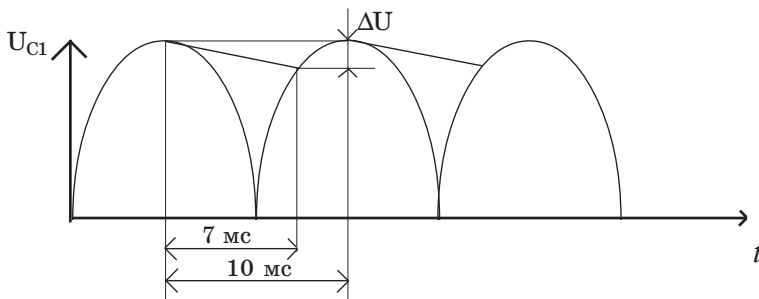


Рис. 3. Диаграмма напряжений на конденсаторе фильтра C1

Рассмотрим представленную на рис. 3 диаграмму напряжений на конденсаторе C1, предполагая при этом, что разряд конденсатора C1 через схему стабилизатора происходит постоянным током (что на самом деле можно принять верным только в первом приближении), и поэтому напряжение на конденсаторе падает по линейному закону.



$$C = \Delta Q / \Delta U; I_p \Delta t = C \Delta U$$

где  $I_p$  – ток разряда конденсатора, который можно в первом приближении считать постоянным и равным току нагрузки;  
 $\Delta t$  – время разряда конденсатора, лежащее в интервале 5...10 мс. Примем его равным 7 мс.

Тогда для величины  $C_1$  получим оценку

$$C_1 = I_n \Delta t / \Delta U = 1000 \text{ мА} \cdot 7 \text{ мс} / 2 \text{ В} = 3500 \text{ мкФ}.$$

Оценим параметры выпрямительных диодов VD1...VD4: на каждом из диодов в открытом состоянии падает напряжение  $U_d$ , которое можно считать равным 1,2...1,5  $U_{\text{лыжи}}$  (напомним, что напряжение лыжи соответствует падению напряжения на прямосмещенном диоде при значении прямого тока, равного 0,1  $I_{d \text{ макс}}$ ). Так как прямое падение напряжения на открытом диоде мало зависит от изменений тока, мощность рассеяния каждого диода составляет  $P_d = 0,5 U_d I_n$ , максимальное запирающее напряжение, прикладываемое к каждому из диодов, составляет  $U_{\text{обр. макс.}} = U_{\text{тр. II}} \sqrt{2} - 2U_d$ ,  $U_{\text{II}}$  – эффективное напряжение вторичной обмотки трансформатора.

Эффективное напряжение вторичной обмотки трансформатора можно оценить следующим образом: номинальное напряжение на выходе выпрямителя 14,5 В, на двух открытых диодах падает  $2U_d = 2 \text{ В}$ , таким образом, амплитуда напряжения на вторичной обмотке трансформатора составит 16,5 В, что соответствует эффективному значению 11,7 В (округлим до 12 В).

Выбор трансформатора Tr1 производим, опираясь на оценку номинальной мощности, требуемое значение эффективного напряжения вторичной обмотки и величину тока вторичной обмотки. Поскольку эффективное значение пульсирующего тока заряда конденсатора  $C_1$  превышает его среднее значение, номинальная мощность трансформатора должна быть выше мощности постоянного тока, отдаваемого выпрямителем и состоящей из мощности, рассеиваемой диодами моста, и мощности, потребляемой стабилизатором и нагрузкой:

$$P_{\text{Tr1 ном}} = \alpha I_n (U_n + 2U_d),$$

где  $\alpha$  – коэффициент формы, равный 1,2.

Напряжение вторичной обмотки при этом может быть набрано путем последовательного включения нескольких вторичных обмоток; каждая из используемых при этом обмоток должна иметь номинальный ток не менее требуемого тока вторичной обмотки (в нашем случае 1,2...1,5 А).

Более точные результаты можно получить по методике, описанной в [5].

Результатом проделанного эскизного расчета является выбор конкретных элементов схемы.

Номиналы всех элементов выбираются из существующих стандартных рядов номиналов с учетом целесообразности применения и могут отличаться от рассчитанных. При установке этих элементов в схему конкретные значения токов и напряжений в цепях могут несколько измениться, что потребует проведения корректирующего детального расчета.

## ДЕТАЛЬНЫЙ РАСЧЕТ УСТРОЙСТВА

Предполагается, что в результате детального расчета проектировщик получает полное представление о токах и напряжениях во всех цепях устройства и режимах работы всех его элементов с учетом допустимых для каждого из конкретных элементов предельных эксплуатационных значений.

## ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПО ЗАДАНЫМ КРИТЕРИЯМ КАЧЕСТВА

Критерии качества проектирования согласуются с руководителем проекта. В нашем случае предлагается оценить коэффициент полезного действия устройства и уровень пульсаций напряжения на нагрузке.

КПД устройства оценивается как отношение полезной мощности к мощности, подведенной к устройству:

$$\eta = \frac{P_{\text{полезн.}}}{P_{\text{подв.}}} = \frac{I_n \cdot U_n \cdot \eta_{\text{Трл}}}{(I_n \cdot U_n + \sum_i P_{\text{эл.и}})}$$

где  $P_{\text{эл.и}}$  – мощность, рассеиваемая каждым из элементов схемы (на практике часть элементов схемы рассеивает пренебрежимо малую мощность);  $\eta_{\text{Трл}}$  – к.п.д. трансформатора.

Для оценки уровня пульсаций на выходе устройства (нагрузке) рассмотрим стабилизатор как некий четырехполюсник, передающий фиксированный уровень пульсаций с выхода выпрямителя ( $DU_{C1}$ ) в нагрузку. Поскольку стабилизатор охвачен отрицательной обратной связью, его коэффициент передачи по напряжению равен  $K_{oc} = K_0 / (1 + K_0\beta)$ ; где  $K_0$  – коэффициент усиления звена прямой передачи,  $\beta$  – коэффициент усиления звена обратной связи.

Для оценки значения  $K_0$  проделаем следующий мысленный эксперимент (см. рис. 4): отсоединим верхний конец резистивного делителя R2-R3 от нагрузки и подадим на него внешнее напряжение, равное номинальному напряжению нагрузки (9 В).

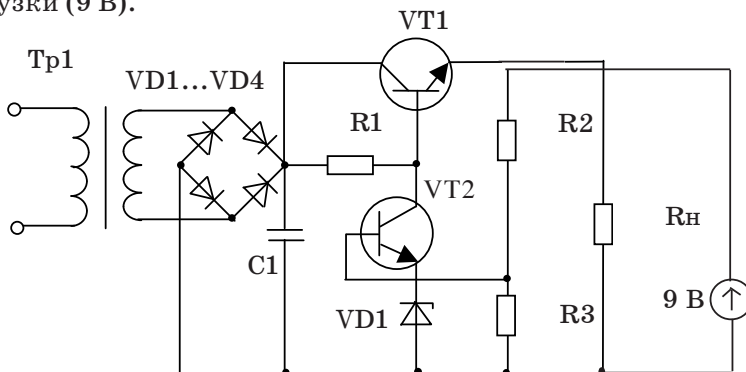


Рис. 4. Схема для определения коэффициента передачи пульсаций без обратной связи

Статические режимы работы всех элементов схемы останутся неизменными, однако сигнал обратной связи на вход схемы сравнения поступать не будет. Тогда отношение  $\Delta U_H / \Delta U_{C1} = K_0$ . Считаем напряжение на базе VT1 неизменным,

$$\Delta I_{R1} = \Delta U_{C1} / R1 = 2 \text{ В} / 300 \text{ Ом} = 6 \text{ мА},$$

соответствующее изменение тока нагрузки составит

$$\Delta I_H = \Delta I_{R1} (\beta + 1) = 6 \text{ мА} \cdot 100 = 600 \text{ мА},$$

изменение напряжения на нагрузке

$$\Delta U_H = \Delta I_H R_H = 600 \text{ мА} \cdot 9 \text{ Ом} = 5,4 \text{ В}.$$

Таким образом,  $K_0 = 5,4 / 2 = 2,7$ .

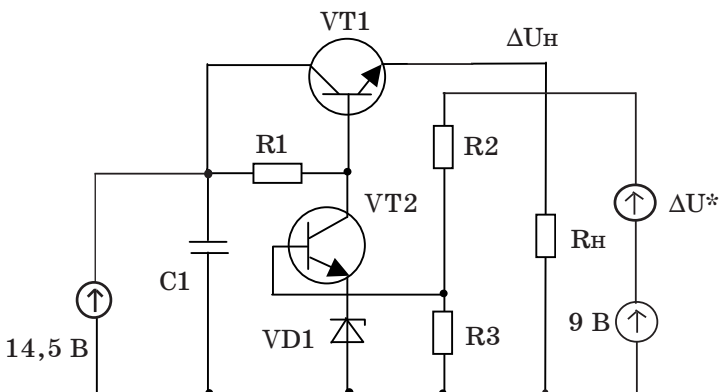


Рис. 5. Схема для определения коэффициента петлевого усиления

Для оценки величины петлевого усиления  $K_0\beta$  видеоизменим схему мысленного эксперимента (см. рис. 5): вместо выхода выпрямителя подключим ко входу стабилизатора источник постоянного напряжения 14,5 В и рассмотрим коэффициент передачи напряжения со входа резистивного делителя обратной связи в нагрузку.

Пусть  $\Delta U_{\text{вх}} = \Delta U^*$ ;

$$\Delta U_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{н}} = \Delta U^* \cdot [R_3 / (R_2 + R_3)] K_{\text{нVT2}} \cdot K_{\text{нVT1}};$$

$$K_0\beta = [R_3 / (R_2 + R_3)] \cdot [R_{133}(b + 1)R_{\text{н}}] / r_{\text{дифф. VD1}} =$$

$$= [7,5 / (1,5 + 7,5)] \cdot [0,3 \times 0,9 / (0,3 + 0,9)] / 0,007 = 26,6;$$

$K_{\text{ос}} = 2,7 / (1 + 26,6) = 0,097$ ; откуда уровень пульсаций на нагрузке составит  $0,097 \cdot 2 \text{ В} = 0,19 \text{ В}$ .

Как отнестись к полученному результату? Качество стабилизации не слишком велико. Как видно из расчета, для улучшения стабилизации следует увеличить  $K_{\text{нVT2}}$ , что возможно при увеличении номинала резистора R1, для чего потребовалось бы увеличить напряжение на выходе выпрямителя  $U_{\text{C1}}$ . Платой за это будет увеличение мощности, рассеиваемой транзистором VT1 и, следовательно, уменьшение к.п.д.

Обсуждение способов улучшения параметров спроектированного устройства выходит за рамки поставленной задачи, но соответствующий вопрос вполне может возникнуть во время защиты проекта.

## РАЗРАБОТКА ЭСКИЗА РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ

Разработка эскиза размещения производится с учетом габаритных размеров используемых в схеме элементов и условий функционирования. Так, например, для функционирования транзистора VT1 в рассчитанном режиме потребуется применение теплоотвода в виде радиатора.

$S, \text{см}^2$

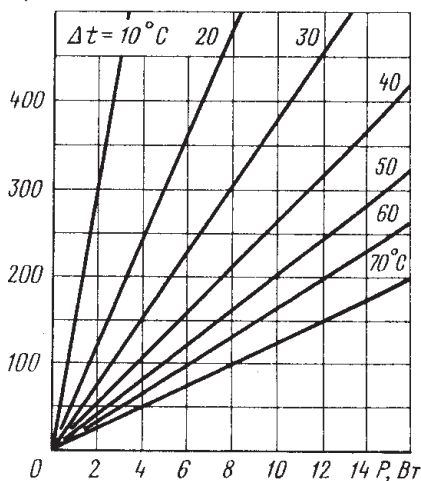


Рис. 6. Зависимость площади радиатора  $S$  от рассеиваемой мощности  $P$  для различных температур перегрева  $\Delta t$ .

Анализ процессов теплообмена в радиоэлектронной аппаратуре является весьма сложной задачей, однако существует большое количество отработанных методик, позволяющих использовать для расчета теплообмена простые графики и номограммы.

Если радиатор имеет вид прямой или изогнутой пластины толщиной 2...5 мм, то для расчета ее размеров можно использовать семейство графиков [29], приведенных на рис. 6. Здесь  $P$  — рассеиваемая прибором

мощность,  $\Delta t^\circ$  — допустимый перегрев.

При использовании радиаторов иного типа (пластинчатых, игольчатых) дополнительно учитывается коэффициент эффективной площади теплорассеяния для радиатора данного типа.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

### Учебная литература

1. В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. Электроника. М.: Высшая школа, 1991 г.
2. Н.М. Тугов, Б.А. Глебов, Н.А. Чарыков. Полупроводниковые приборы. М.: Энергоатомиздат, 1990 г.
3. Электронные приборы (Под ред. Г.Г. Шишкина). М.: Энергоатомиздат, 1989 г.
4. Миловзоров В.П. Элементы информационных систем. М.: Высшая школа, 1989 г.
5. У. Титце, К. Шенк. Полупроводниковая схемотехника. М.: Мир, 1980 г.
6. В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин, А.Д. Шинков. Полупроводниковые приборы. М.: Высшая школа, 1981 г.

### Пособия по расчетам

7. Л.Н. Преснухин. Расчет элементов цифровых устройств. М.: Высшая школа, 1991 г.
8. В.А. Завадский. Компьютерная электроника. К.: ТОО Век, 1996 г.
9. П. Хоровиц, У. Хилл. Искусство схемотехники, (в 3-х томах), т1. М.: Мир, 1993 г.
10. Основы радиоэлектроники (под ред. Преснухина). М.: МАИ, 1993 г.
11. М. Кауфман, А. Сидман. Практическое руководство по расчетам схем в электронике, в 2-х томах. М.: Энергоатомиздат, 1991 г.
12. Расчет электронных схем. Примеры и задачи. М.: Высшая школа, 1987 г.
13. В.Л. Шилов. Линейные интегральные схемы. М.: Сов. радио, 1979 г.
14. Л. Фолкенберри. Применение операционных усилителей и линейных ИС. М.: Мир, 1985 г.
15. Я.С. Кублановский. Тиристорные устройства. М.: Радио и связь, 1987 г.

### Справочная литература

16. Тиристоры (справочник). М.: Радио и связь, 1980 г.
17. Дiodы (справочник). М.: Радио и связь, 1990 г.

18. Транзисторы (справочник). М.: Радио и связь, 1989 г.
19. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы (справочник) (под ред. Н.Н. Горюнова). М.: Энергоатомиздат, 1987 г.
20. А.М. Юшин. Цифровые микросхемы для электронных устройств (справочник). М.: Высшая школа 1993 г.
21. В.Л. Шилов. Популярные цифровые микросхемы (справочник). М.: Металлургия, 1988 г.
22. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы (под ред. С.В. Якубовского) (справочник). М.: Радио и связь, 1990 г.
23. Применение интегральных микросхем в электронной вычислительной технике (под ред. Б.Н. Файзулаева) (справочник). М.: Радио и связь, 1987 г.
24. В.Ф. Ляровский, О.Б. Мурадян. Электрические соединители (справочник). М.: Радио и связь, 1988 г.
25. Разработка и оформление конструкторской документации РЭА (справочник). М.: Радио и связь, 1989 г.
26. И.Н.Сидоров, В.В. Мукосеев, А.А. Христинин. Малогабаритные трансформаторы и дроссели (справочник). М.: Радио и связь, 1985 г.
27. Резисторы (справочник) (под ред. С.И. Четверткова). М.: Радио и связь, 1991 г.
28. Конденсаторы (справочник) (под ред. С.И. Четверткова). М.: Радио и связь, 1993 г.
29. Справочная книга радиолюбителя-конструктора (под ред. Н.И. Чистякова). – М.: Радио и связь, 1990.

#### Правила выполнения электрических схем

30. ГОСТ 2.301-68, 2.302 –68, 2.303- 68, 2.104 – 68, 2.109 –73, 2.201–80, 2.701 – 84, 2.702- 75, 2.708 – 81 ... 2.710 – 81
31. Стандарт предприятия. Курсовое и дипломное проектирование. Общие требования к оформлению. СТП ЮУрГУ 04-2001/ Составители: Сырейщикова Н.В., Гузеев В.И., Сурков И.В., Винокурова Л.В., – Челябинск: ЮУрГУ, 2001, – 48с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
1. О проектировании .....	4
2. О целях проектирования .....	4
3. О методах проектирования .....	5
4. Цели и основные задачи курсового проекта .....	6
5. Требования к курсовому проекту и его выполнению .....	6
6. Требования к пояснительной записке .....	7
7. Требования к защите проекта .....	8
ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ТИПА С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ .....	
Функциональный состав устройства .....	10
Принцип действия устройства .....	12
Эскизный расчет устройства .....	13
Детальный расчет устройства .....	18
Оценка результатов проектирования по заданным критериям качества .....	18
Разработка эскиза размещения элементов схемы .....	21