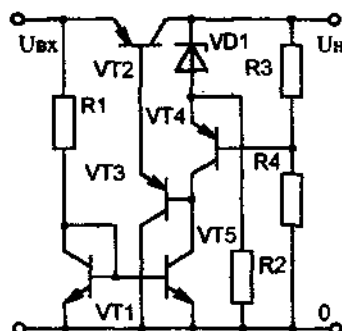


СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ С НЕПРЕРЫВНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

Сборник аттестационных заданий по дисциплине
«Электронпреобразовательные устройства» для студентов
очной и заочной форм обучения по специальностям
230200 «Сервис бытовой радиоэлектронной аппаратуры» и
200700 «Радиотехника»

Часть 2



АВТОРЫ

Е.И. Старченко
И.Е. Старченко

Профессор каф. "Радиотехника", канд. техн. наук
Аспирант каф. "Радиотехника"

РЕЦЕНЗЕНТЫ

К.Е. Румянцев
Н.Н. Прокопенко

Зав. кафедрой РЭС, профессор, докт. техн. наук
Зав. кафедрой "Радиотехника", профессор, канд. техн. наук

В сборнике приводятся задачи, предназначенные для контроля знаний по дисциплине "Электропреобразовательные устройства РЭС" при изучении раздела "Стабилизаторы напряжения с непрерывным регулированием" при проведении аттестации или самоаттестации.

Сборник аттестационных заданий предназначен для студентов специальностей 200700 "Радиотехника" и 230200 "Сервис БРЭА" и может быть также использован при изучении дисциплин "Схемотехника аналоговых электронных устройств" и "Теория управления и радиоавтоматика".

СОГЛАСОВАНО

Протокол заседания НМСС
"Радиотехника" № от 12.03. 1998г

ВВЕДЕНИЕ

В процессе изучения раздела "Стабилизаторы напряжения с непрерывным регулированием" по дисциплине "Электропреобразовательные устройства РЭС" студенты должны усвоить следующие узловые положения:

- принципы функционирования типовых схем СН с непрерывным регулированием;
- методы анализа, принципы и способы улучшения технических характеристик СН, влияние отрицательной обратной связи на эти характеристики;
- принципы схемотехнического проектирования СН, особенности схемотехники СН с эмиттерным и коллекторным выходом регулирующего элемента;

- принципы построения цепей защит и цепей запуска; особенности проектирования СН как на дискретных элементах, так и методами интегральной технологии.

Для успешного решения всех задач необходимым глубоким знанием таких дисциплин, как "Основы теории цепей" и "Схемотехника аналоговых электронных устройств". Весьма полезными при решении задач могут оказаться пособия [2-4].

Содержание сборника задач разбито по разделам, соответствующим классификации стабилизаторов напряжения (СН). Подписывающие подписи однозначно соотносят условие задачи и рисунок, поэтому в тексте задачи ссылки на рисунок отсутствуют. Нумерация задач выбрана сквозной в первой и второй частях, чтобы исключить ошибки при выдаче заданий. Во вторую часть сборника вошли, в основном, задачи, основанные на анализе и параметрическом синтезе СН с коллекторным выходом регулирующего элемента. Каждая задача внутри себя разбита на несколько вопросов различного уровня сложности, причем правильный ответ на последующий вопрос может быть дан только при правильном решении предыдущего задания. Некоторые задачи или задания некоторых уровней – так называемые "задачи с неполными данными", допускающие неоднозначные ответы. Подобные задачи стимулируют у студента развитие инженерных навыков, требующих не только умения анализировать, но и осуществлять параметрический синтез схем СН. Следует заметить, что правильность решения задач студент может проверить самостоятельно с помощью любой системы схемотехнического моделирования, например PSpice. Более того, настоятельно рекомендуется поступать именно так. В этом случае особое внимание должно уделяться выбору активных компонентов моделируемых устройств. Так, если в задаче указаны конкретные типы полупроводниковых элементов, а в библиотеках моделей компонентов системы схемотехнического моделирования они отсутствуют, необходимо выбрать для замены близкие по параметрам полупроводниковые приборы из соответствующей библиотеки.

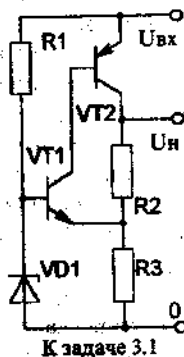
3 СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПЯЖЕНИЯ С КОЛЛЕКТОРНЫМ ВЫХОДОМ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА.

Задача 3.1

Определить:

- номиналы резисторов $R1 - R3$, если $U_H = 9В$, стабилитрон $VD1 - KC156A$, транзисторы $VT1 - KT315A$, $VT2 - KT361A$, ток нагрузки - $10 мА$, а входное напряжение составляет $12 В$;
- коэффициент стабилизации при токе нагрузки $5 мА$;
- нестабильность по току нагрузки;
- ток коллектора транзистора $VT2$ при коротком замыкании выхода стабилизатора;
- абсолютное изменение напряжения U_H при изменении тока нагрузки от $10 мА$ до нуля;
- температурный дрейф выходного напряжения.

Выделите основной недостаток схемы, ухудшающий её точностные параметры и предложите возможные пути их улучшения в рамках заданной схемной конфигурации.



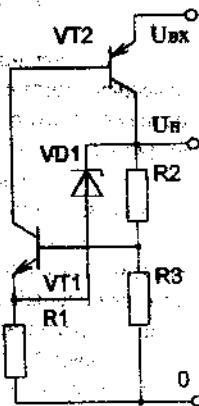
К задаче 3.1

Задача 3.2

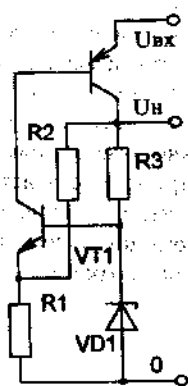
Определить:

- номиналы резисторов $R1 - R3$, если $U_H = 10В$, стабилитрон $VD1 - KC133A$, транзисторы $VT1 - 315В$, $VT2 - 361A$;
- коэффициент стабилизации по напряжению;
- выходное сопротивление стабилизатора;
- абсолютное изменение напряжения U_H при изменении входного напряжения от $10 В$ до $12 В$;
- максимально возможный ток нагрузки при уменьшении выходного напряжения на 10% и ток коллектора $VT2$ при коротком замыкании выхода;
- абсолютное изменение выходного напряжения при изменении температуры окружающей среды от $20^{\circ}C$ до $80^{\circ}C$.

Предложите способы повышения стабильности выходного напряжения при изменении тока нагрузки и входного напряжения, оставаясь в рамках заданной структуры стабилизатора, а также экономичный способ его запуска.



К задаче 3.2



К задаче 3.3

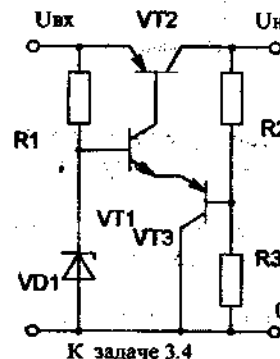
Определить:

- номиналы резисторов $R1 - R3$ при токе нагрузки $10 мА$, $U_H = 12В$, $U_{ВХ} = 15В$, выбрав самостоятельно активные компоненты и стабилитрон $VD1$ для этого случая;

Задача 3.3

- коэффициент стабилизации по напряжению;
- нестабильность по току нагрузки;
- температурный дрейф выходного напряжения;
- оцените максимально возможный КПД данной схемы (найдите минимально возможную разницу напряжений вход-выход, при которой сохраняется работоспособность стабилизатора);
- абсолютное изменение выходного напряжения при изменении входного от $15В$ до $18В$.

Предложите схему цепи запуска стабилизатора, не ухудшающего его энергетических и точностных характеристик.



К задаче 3.4

Задача 3.4

Определите:

- выходное напряжение стабилизатора и номинал резистора $R1$, если в качестве $VD1$ используется стабилитрон $KC156A$, $R2 = R3 = 10 кОм$; транзисторы $VT1, VT3 - KT361A$, $VT2 - KT315B$; $U_{ВХ} = 12 В$;
- коэффициент стабилизации по напряжению при токе нагрузки $10 мА$;
- выходное сопротивление стабилизатора;
- абсолютное изменение выходного напряжения при изменении тока нагрузки от $10 мА$ до нуля.

Сопоставьте получившиеся результаты с результатом расчета схемы задачи 3.1, объясните разницу;

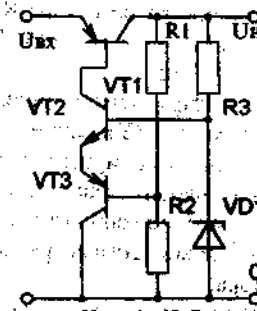
- температурный дрейф выходного напряжения;
- ток коллектора транзистора $VT1$ при коротком замыкании выхода стабилизатора.

Предложите способ токовой защиты стабилизатора и оцените влияние цепи защиты на максимально возможный КПД стабилизатора.

Задача 3.5

Определить:

- выходное напряжение стабилизатора и номинал резистора $R3$, если $R2 = R1 = 10 кОм$, $VD1 - KC156A$, $VT1, VT3 - KT361A$, $VT2 - 315В$, $U_{ВХ} = 12 В$;
- коэффициент стабилизации по напряжению при токе нагрузки $10 мА$. Сопоставьте результат расчета с соответствующим для задачи 3.4. Объясните получившиеся отличия;
- нестабильность по току нагрузки;
- абсолютное изменение выходного напряжения



К задаче 3.5

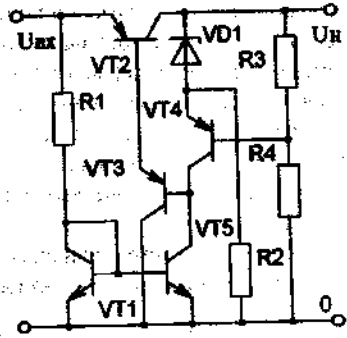
при изменении температуры от 0°C до 40°C.

Предложите способ запуска стабилизатора, не ухудшающий его точности и энергетические характеристики. Оцените ток коллектора транзистора VT1 в режиме короткого замыкания выхода при использовании предложенной Вами цепи запуска.

Задача 3.6

Определите:

- номиналы элементов R1-R4, если $U_{BX}=10$ В, $U_H=5$ В, VD1 - КС133А, транзисторы VT1, VT5 - К159НТ1, VT3-VT4 - КТ361А, ток нагрузки - 10 мА;
- коэффициент стабилизации по напряжению. (Указание: учесть прохождение входного возмущения как через резистор R1, так и через регулирующий элемент);
- температурный дрейф выходного напряжения. (Указание: учесть влияние температурного изменения тока через резистор R1 на изменения выходного напряжения);
- абсолютное изменение выходного напряжения при изменении тока нагрузки от 10 мА до нуля;
- ток коллектора транзистора VT2 при коротком замыкании выхода стабилизатора.

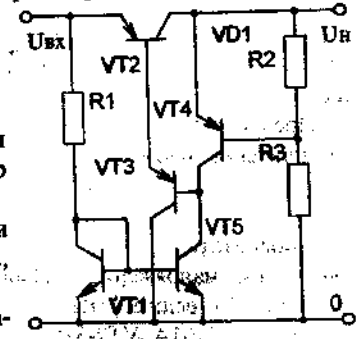


К задаче 3.6

Задача 3.7

Определите:

- выходное напряжение стабилизатора, если транзистор VT5 - КТ361А, резистор $R2=1$ кОм, $R3=4,2$ кОм;
- номинал резистора R1 при токе нагрузки 20 мА, $U_{BX}=8$ В, VT1, VT4 - К159НТ1, VT2, VT3-КТ361А;
- коэффициент стабилизации выходного напряжения. (Указание: учесть прохождение входного возмущения как через регулирующий элемент, так и через резистор R1);
- выходное сопротивление стабилизатора;
- ток коллектора транзистора VT2 при коротком замыкании выхода стабилизатора;
- температурный дрейф выходного напряжения. (Учесть влияние темпера-



К задаче 3.7

турного изменения тока через резистор R1 на выходное напряжение).

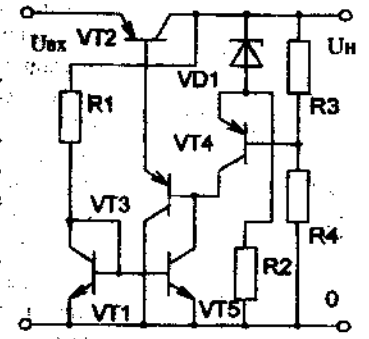
Предложите цепь защиты стабилизатора от токовой перегрузки и оцените ее влияние на точностные и энергетические характеристики стабилизатора.

Задача 3.8

Определить:

- выходное напряжение U_H , если VD1 - КС133, $R3=R4=2$ кОм; VT4 - КТ361А;
- для тока нагрузки 15 мА и $U_{BX}=10$ В номиналы элементов R1 и R2, если транзисторы VT1 и VT5 - хорошо согласованные КТ315А, VT3, VT4 - КТ361А;
- коэффициент стабилизации по напряжению;
- выходное сопротивление стабилизатора;
- температурный дрейф выходного напряжения;
- абсолютное изменение выходного напряжения при изменении тока нагрузки от 15 мА до 5 мА.

Предложите цепь запуска стабилизатора и оцените ее влияние на точностные и энергетические характеристики.



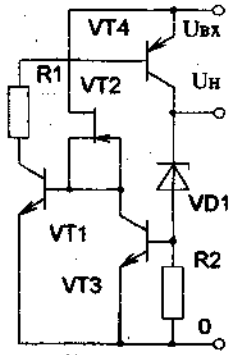
К задаче 3.8

Задача 3.9

Определить:

- выходное напряжение, если $U_{BX}=10$ В, в качестве стабилитрона использован КС147А, резистор $R2=200$ Ом, транзистор VT3 - КТ315А;
- коэффициент стабилизации по напряжению при токе нагрузки 30 мА, если VT1 - КТ315В, VT2 - КП303А, VT4 - КТ814А. (Указание: оцените влияние входного возмущения на выходное напряжение при прохождении его как через источник тока на транзисторе VT2, так и через регулирующий элемент);
- выходное сопротивление стабилизатора;
- максимально возможный ток коллектора транзистора VT4 при коротком замыкании выхода. Предложите способ ограничения этого тока на заданном уровне;
- температурный дрейф выходного напряжения.

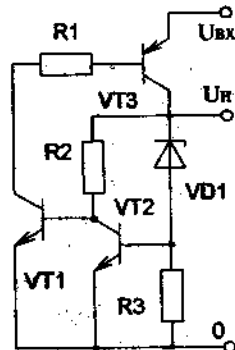
Предложите, как можно осуществить регулировку выходного напряжения и варианты модификации схемы для дальнейшего повышения коэффициента стабилизации, оставаясь в рамках заданной схемой конфигурации.



К задаче 3.9

Задача 3.10

Определить:



К задаче 3.10

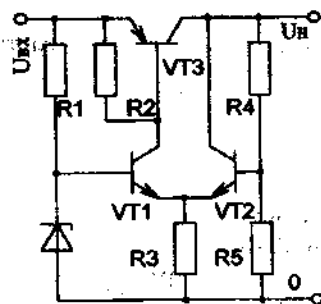
- а) выходное напряжение, если $U_{BX} = 5$ В, транзистор VT2 - KT315A, стабилитрон VD1 - KC168A. Оцените влияние изменения сопротивления резистора R3 на выходное напряжение;
 б) сопротивления резисторов R2 и R1, если ток нагрузки составляет 20 мА, транзистор VT1 - KT315A, VT3 - KT814B;
 в) нестабильность по току нагрузки;
 г) абсолютное изменение выходного напряжения при изменении температуры окружающей среды от 20 °C до 50 °C;

Предложите варианты построения цепи запуска стабилизатора, оцените влияние цепи запуска на точностные параметры стабилизатора.

Оцените влияние резистора R1 на максимально возможный ток нагрузки.

Задача 3.11

Определить:



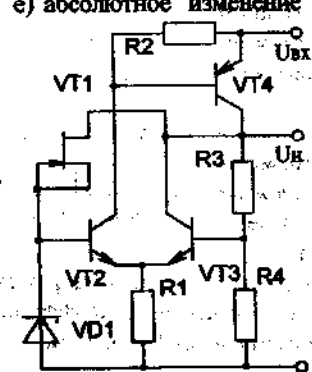
К задаче 3.11

- а) параметры элементов схемы и активные компоненты, если $U_{BX} = 12$ В, $U_H = 9$ В, $I_H = 10$ мА;
 б) коэффициент стабилизации по напряжению;
 в) выходное сопротивление стабилизатора;
 г) температурный дрейф напряжения U_H ;
 д) аналитическую зависимость максимального тока нагрузки от параметра h_{21} регулирующего элемента, сопротивления резистора R3 и параметров других элементов;

е) абсолютное изменение выходного напряжения при изменении тока нагрузки от 5 мА до 15 мА;
 Предложите цепь защиты стабилизатора от токовой перегрузки. Оцените максимально возможный к.п.д. стабилизатора при наличии и отсутствии цепи токовой защиты.

Задача 3.12

Определить:

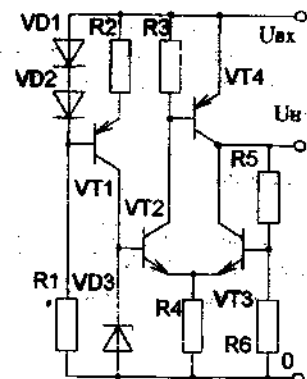


К задаче 3.12

- а) параметры элементов схемы при $U_{BX} = 12$ В, $U_H = 9$ В, $I_H = 20$ мА, если стабилитрон VD1 - KC156A, VT1 - КП103Г, транзисторы VT2, VT3 - K159HT1A.

(Транзистор VT4 выбрать самостоятельно);

- б) коэффициент стабилизации по напряжению;
 в) нестабильность по току нагрузки;
 г) максимально возможный ток коллектора транзистора VT4 при коротком замыкании выхода;
 д) абсолютное изменение выходного напряжения при изменении температуры от 0 °C до 40 °C.



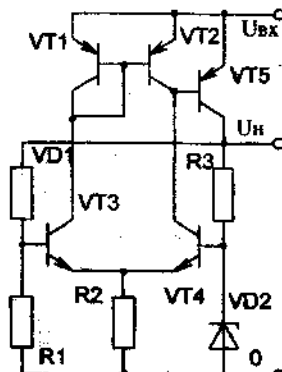
К задаче 3.13

Предложите цепь запуска и оцените ее влияние на точностные и энергетические характеристики стабилизатора. В чем преимущество использования дифференциального каскада в качестве усилителя сигнала рассогласования в сравнении с одноконтурным транзистором?

Задача 3.13

Определить:

- а) выходное напряжение U_H стабилизатора при $U_{BX} = 10$ В, $I_H = 15$ мА, VD3 - KC147A, R5=R6=5,1 кОм, VT2, VT3 - K159HT1A. (Остальные компоненты выбрать самостоятельно);
 б) коэффициент стабилизации по напряжению. (Указание: для упрощения анализа нестабильность источника опорного напряжения определять из условия, что дифференциальное сопротивление коллектор-база транзистора VT1 стремится к бесконечности, а вся нестабильность тока через стабилитрон обусловлена конечными дифференциальными сопротивлениями диодов VD1 и VD2);
 в) выходное сопротивление стабилизатора;
 г) абсолютное изменение выходного напряжения при изменении тока нагрузки от 15 мА до нуля;



К задаче 3.14

- д) температурный дрейф выходного напряжения;
 Предложите цепь запуска и оцените ее влияние на точностные и энергетические параметры стабилизатора.

Задача 3.14

Определить:

- а) параметры элементов схемы при $U_{BX} = 15$ В, $U_H = 12$ В, токе нагрузки 20 мА;
 б) коэффициент стабилизации по напряжению. Укажите параметры, наиболее сильно влияющие на коэффициент стабилизации. Предложите способы его повышения, оставаясь в рамках данной схемной

конфигурация;

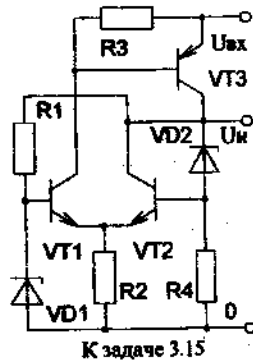
в) нестабильность по току нагрузки;

г) температурный дрейф выходного напряжения;

д) ток коллектора транзистора VT5 при коротком замыкании выхода стабилизатора;

е) максимально возможный ток нагрузки при выбранных вами параметрах элементов схемы.

Предложите цепь запуска и оцените ее влияние на точностные и энергетические характеристики данного стабилизатора.



К задаче 3.15

Задача 3.15

Определить:

а) выходное напряжение, если $U_{вх} = 12$ В, ток нагрузки - 15 мА, стабилитроны VD1, VD2 - КС147А. (Параметры остальных элементов выбрать самостоятельно);

б) коэффициент стабилизации по напряжению;

в) выходное сопротивление стабилизатора;

г) абсолютное изменение выходного напряжения при изменении температуры окружающей среды от 20 °С до 60 °С;

д) максимально возможный ток нагрузки и мощность, рассеиваемую на регулирующем элементе в этом случае.

Предложите цепь защиты регулирующего элемента от токовой перегрузки

4 СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПЯЖЕНИЯ С ЗАЩИТОЙ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ОТ ТОКОВОЙ ПЕРЕГРУЗКИ

Задача 4.1

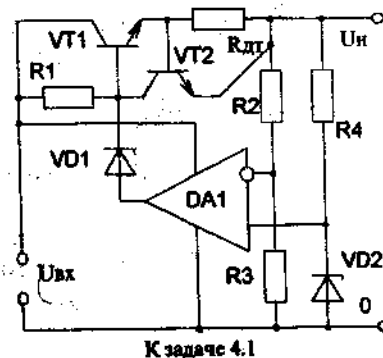
Определить:

а) параметры элементов стабилизатора при $U_{вх} = 20$ В, $U_{н} = 15$ В, максимальном токе нагрузки 100 мА, если в качестве DA1 использована микросхема К140УД7 (транзисторы выбрать самостоятельно);

б) коэффициент стабилизации по напряжению;

в) выходное сопротивление стабилизатора;

г) аналитическую зависимость нагрузочной характеристики. (Построить график. Оценить, как изменяется ток эмиттера



К задаче 4.1

регулирующего элемента от момента срабатывания цепи защиты до короткого замыкания). По нагрузочной характеристике построить зависимость мощности, рассеиваемой на регулирующем элементе от режима холостого хода до режима короткого замыкания.

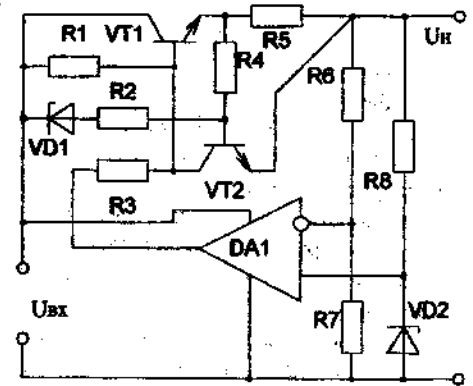
Задача 4.2

Определить:

а) выходное напряжение при $U_{вх} = 20$ В и максимальном токе нагрузки 100 мА, если стабилитрон VD1 - Д814А, $R_8 = R_9 = 10$ кОм, микросхема DA1 - К140УД7. Параметры остальных элементов выбрать самостоятельно;

б) параметры элементов цепи токовой защиты таким образом, чтобы мощность, рассеиваемая на регулирующем элементе при перегрузке, не превышала мощность при максимальном токе нагрузки;

в) коэффициент стабилизации по напряжению;



К задаче 4.2

г) выходное сопротивление.

Задача 4.3

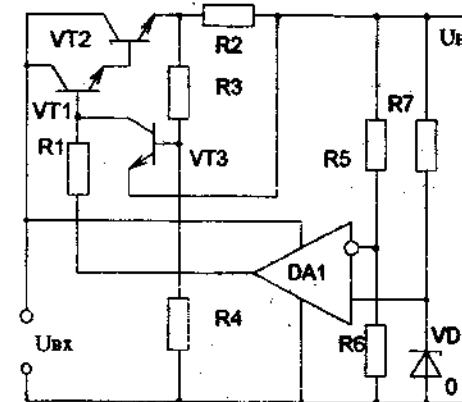
Определить:

а) параметры элементов схемы при $U_{вх} = 15$ В, $U_{н} = 9$ В, $I_{н, макс} = 1$ А, при условии, что в качестве усилителя сигнала рассогласования используется усилитель с коэффициентом усиления по напряжению $K_U = 1000$, максимальным выходным током 5 мА и выходным сопротивлением 1 кОм;

б) аналитическое выражение для нагрузочной характеристики вплоть до режима короткого замыкания выхода стабилизатора. Параметры элементов цепи защиты выбрать так, чтобы выполнение функций защиты начиналось при токе, на 20 % превышающем максимальный ток нагрузки, а мощность на регулирующем элементе в режиме короткого замыкания не превышала мощность при максимальном токе нагрузки;

в) коэффициент стабилизации по напряжению;

г) выходное сопротивление стабилизатора.



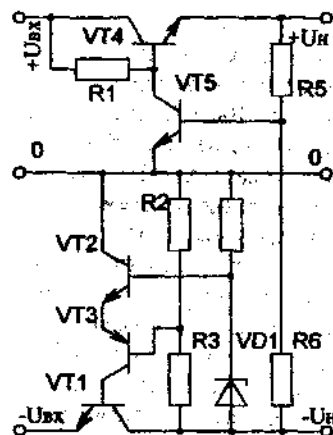
К задаче 4.3

5 ПРОСТЕЙШИЕ ДВУХПОЛЯРНЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПЯЖЕНИЯ

Задача 5.1

Определить:

- параметры элементов схемы при $U_{ВХ} = \pm 20 \text{ В}$, $U_H = \pm 15 \text{ В}$, $I_H = \pm 10 \text{ мА}$, $U_{СТ} = 5.6 \text{ В}$;
- коэффициент стабилизации по напряжению в ведущем канале;
- нестабильность напряжения в ведомом канале при одновременном изменении входного напряжения в отрицательном и положительном каналах на $\pm 10\%$;
- нестабильность напряжения в ведомом канале при увеличении тока нагрузки в ведущем канале от 5 мА до 10 мА ;
- температурную нестабильность выходного напряжения в ведущем и ведомом каналах.

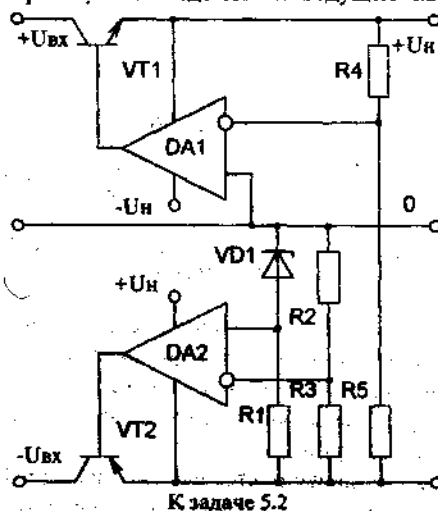


Задача 5.2

Определить:

- параметры элементов схемы при $U_{ВХ} = \pm 20 \text{ В}$, $U_H = \pm 15 \text{ В}$, $I_H = \pm 20 \text{ мА}$, при условии что в качестве усилителей сигнала рассогласования используются одинаковые усилители с параметрами: $K_U = 1500$, $I_{ВЫХ.МАКС} = 3 \text{ мА}$, $R_{ВЫХ} = 500 \text{ Ом}$;
- коэффициенты стабилизации по напряжению в ведомом и ведущем каналах;
- выходное сопротивление ведущего и ведомого каналов;
- абсолютное изменение напряжения в ведомом канале при сбросе тока нагрузки в ведущем канале от 20 мА до нуля;
- температурную нестабильность выходного напряжения в ведущем и ведомом каналах.

Предложите цепь защиты, которая обладает триггерным эффектом, прекращая функционирование как ведущего, так и ведомого каналов при возникновении перегрузки в любом канале.

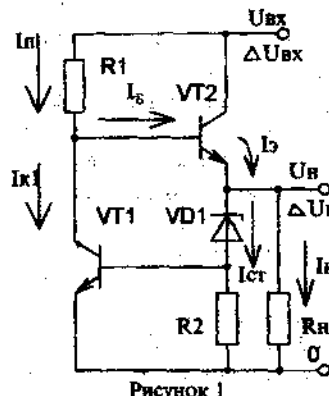


6 ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Прежде чем приступить к решению задачи, выбранной в качестве примера, необходимо сделать несколько замечаний. Приведенные в первой и второй частях сборников задачи относятся к так называемым задачам с неполными данными и требуют для своего решения творческого, инженерного подхода. Все задачи, приведенные в сборниках, несмотря на свою конкретную предметную направленность, могут решаться различными методами.

В частности, большинство задач может быть решено применением стандартной методики, приведенной в [1]. Отметим, что выбор параметров элементов для задания статического режима – тривиальная задача из курса "Схемотехника аналоговых электронных устройств". В данном примере при анализе дифференциальных параметров СН будет продемонстрирован несколько иной подход – метод приращений.

Рассмотрим решение задачи 2.1 (Ч.1). Схема анализируемого СН приведена на рисунке 1, а условие задачи будет приводиться



по пунктам в процессе решения задачи.

а) определим выходное напряжение стабилизатора. Оно складывается из падений напряжений на стабилитроне VD1 и переходе база-эмиттер транзистора VT1:

$$U_H = U_{СТ} + U_{БЭ1} \quad (1)$$

С учетом того, что в качестве стабилитрона использован КС147А с напряжением стабилизации 4.7 В , а напряжение база-эмиттер для кремниевого транзистора можно принять равным 0.7 В , $U_H = 5.4 \text{ В}$.

б) определим требуемый номинал резистора R1, исходя из следующих соображений. Поскольку диапазон изменения входного напряжения задан и составляет $10 - 12 \text{ В}$, необходимо обеспечить максимальный ток нагрузки при минимальном входном напряжении 10 В . Ток I_H , протекающий через резистор R1, перераспределяется между током базы I_B транзистора VT2 и током коллектора I_K транзистора VT1. Поэтому сопротивление резистора R1 можно определить как

$$(U_{ВХ} - U_H - U_{БЭ2}) / (I_{K1} + I_B) = R_1,$$

$$\text{где } I_B = (I_H + I_{СТ}) / \beta_2;$$

β_2 - коэффициент усиления тока базы транзистора VT2;

I_{CT} - ток, протекающий через стабилитрон VD1;

U_{E32} - напряжение база-эмиттер транзистора VT2.

Задавшись током $I_{CT} = 2 \text{ мА}$, $\beta_2 = 50$ при токе $I_H = 30 \text{ мА}$, и током $I_{K1} = 1 \text{ мА}$, находим, что $R_1 = 2,43 \text{ кОм}$. Выбираем сопротивление $R_1 = 2,4 \text{ кОм}$ (ближайшее из ряда).

Особо отметим правило выбора тока коллектора I_{K1} транзистора VT1, работающего в качестве усилителя сигнала рассогласования. Если его выбрать слишком большим, уменьшится сопротивление резистора R1 и, как следствие, вырастет коэффициент прямой передачи, снизится к.п.д. и коэффициент стабилизации по напряжению $1/U$. Если I_{K1} будет слишком мал, снизится коэффициент усиления транзистора VT1, что также приведет к снижению коэффициента стабилизации. (В этом читатель может убедиться самостоятельно, например, проводя моделирование данной схемы в программе PSpice). Эти рассуждения будут справедливыми и для других подобных схем СН, приведенных в этих сборниках задач. Можно, конечно, очень строго выбрать ток I_{K1} , найдя экстремум функции коэффициента стабилизации в зависимости от сопротивления резистора R1, но, руководствуясь инженерными соображениями или предшествующим опытом, можно утверждать, что при $I_{K1} = 1 \text{ мА}$ режим СН будет близок к оптимальному. Должно быть понятно, что при увеличении входного напряжения до 12 В ток через резистор R1 будет возрастать, что, в первую очередь, приведет к увеличению тока I_{K1} . Аналогично, при уменьшении тока нагрузки ток коллектора транзистора VT1 также будет возрастать.

в) определим номинал резистора R2. Поскольку мы уже задались током через стабилитрон, а базовым током транзистора VT1 можно пренебречь, то сопротивление резистора R2 определим следующим образом:

$$R_2 = U_{E32} / I_{CT} = 350 \text{ [Ом]}.$$

Для определения коэффициента стабилизации можно воспользоваться классическими методами расчета для систем с глубокой отрицательной обратной связью или, как уже упоминалось, воспользоваться методом приращений. Дифференцируя (1) по U_{BX} , получим:

$$dU_H / dU_{BX} = dU_{CT} / dU_{BX} + dU_{E32} / dU_{BX} \quad (2)$$

В свою очередь, первое слагаемое в правой части (2) можно представить следующим образом:

$$dU_{CT} / dU_{BX} = (dU_{CT} / dI_{CT}) (dI_{CT} / dU_{BX}) = r_{CT} dI_{CT} / dU_{BX}, \quad (3)$$

где r_{CT} - дифференциальное сопротивление стабилитрона VD1.

Приращение тока через стабилитрон определяется, практически, прира-

щением тока через резистор R2, так как базовым током транзистора VT1 мы пренебрегаем:

$$dI_{CT} = dU_{E32} / R_2. \quad (4)$$

С учетом (3) и (4) выражение (2) можно представить следующим образом:

$$dU_H / dU_{BX} = (1 + r_{CT} / R_2) dU_{E32} / dU_{BX} \quad (5)$$

По сути, выражение, стоящее в скобках в равенстве (5) - не что иное как величина, обратная коэффициенту передачи делителя напряжения обратной связи, образованного дифференциальным сопротивлением стабилитрона и резистором R2.

По аналогии с выражением (3) запишем производную напряжения U_{E32} :

$$dU_{E32} / dU_{BX} = (dU_{E32} / dI_{31}) (dI_{31} / dU_{BX}) = (r_{31} / \alpha) (dI_{K1} / dU_{BX}), \quad (6)$$

где α - коэффициент передачи тока эмиттера транзистора VT1;

I_{31} , I_{K1} - токи эмиттера и коллектора транзистора VT1 соответственно;

r_{31} - дифференциальное сопротивление эмиттера транзистора VT1.

Приращение тока коллектора транзистора VT1 обусловлено приращением тока через резистор R1 и может быть найдено как

$$dI_{K1} = (dU_{BX} - dU_H) / R_1 - dU_H / R_{BX}, \quad (7)$$

где $R_{BX} \approx R_H / (\beta + 1)$ - входное сопротивление регулирующего элемента на транзисторе VT2;

$R_{H.3}$ - эквивалентное сопротивление нагрузки, подключенной к выходу СН;

β - коэффициент передачи тока базы регулирующего элемента.

Отметим, что выражение (7) справедливо для случая, когда дифференциальные сопротивления коллектор-база транзисторов много больше, чем R_1 и R_{BX} , что в нашем случае имеет место.

Подставляя (7) в (6) и получившийся результат в (5), имеем:

$$\frac{dU_H}{dU_{BX}} \left(1 + A \frac{r_{31}}{\alpha} \frac{R_{BX} + R_1}{R_{BX} R_1} \right) = A \frac{r_{31}}{\alpha R_1}, \quad (8)$$

где $A = 1 + r_{CT} / R_2$.

После несложных алгебраических преобразований из выражения (8), при

переходе от производных к конечным приращениям, можно получить:

$$\frac{\Delta U_{BX}}{\Delta U_H} = \frac{\frac{Ar_3}{\alpha} \frac{R_1 + R_{BX}}{R_1 R_{BX}} + 1}{\frac{Ar_3}{\alpha R_1}} = \frac{1 + \frac{K_D K_0 K_{ПР}}{K_D K_{ПР}}}{\frac{1}{K_D K_{ПР}}} = \frac{1 + K_D K_U}{K_{ПР}}, \quad (9)$$

где $K_D = 1/A = R_2/(R_2 + r_{CT})$ — коэффициент передачи делителя напряжения обратной связи;

$K_{ПР} = R_{BX}/(R_{BX} + R_U)$ — коэффициент прямой передачи входного возмущения ΔU_{BX} на базу регулирующего элемента;

$K_0 = \alpha R_1/r_3$ — коэффициент усиления ненагруженного усилителя на транзисторе VT1;

$K_U = \alpha R_1 R_{BX}/r_3(R_1 + R_{BX})$ — реальный коэффициент усиления усилителя на транзисторе VT1 с учетом параллельного соединения резистора R_1 и входного сопротивления регулирующего элемента (VT2).

Получившийся результат (выражение (9)) полностью совпадает с приведенным в [1], с той лишь разницей, что мы заведомо предполагали близким к единице коэффициент передачи по напряжению регулирующего элемента. Кажущаяся сложность приведенной методики оценки коэффициента стабилизации СН компенсируется тем, что не во всех задачах определение $K_{ПР}$ достаточно просто (например, задачи 2.7, 3.6 — 3.8 и некоторые другие). В случае же использования предлагаемой методики все приращения токов и напряжений в схеме могут быть легко учтены.

Прежде чем приступить к численной оценке коэффициента стабилизации, необходимо найти сопротивления r_3 и r_{CT} . Сопротивление

$$r_3 = \varphi_T/I_{E1} = 26 \text{ [Ом]},$$

где φ_T — температурный потенциал, который при комнатной температуре составляет 26 мВ.

Сопротивление r_{CT} , также как и r_3 , зависит от протекающего тока, но в справочниках приводится достаточно редко и только для одного значения тока. Обычно r_{CT} составляет 30 + 50 Ом и для оценочных расчетов можно выбирать это сопротивление относительно произвольно.

Для определения сопротивления R_{H3} к заданному току нагрузки I_H необходимо добавить ток, протекающий через стабилитрон, поэтому

$$R_{H3} = U_H/(I_H + I_{CT}) = 169 \text{ [Ом]},$$

а входное сопротивление транзистора VT2

$$R_{BX} \approx R_{H3}(\beta + 1) = 8,6 \text{ [кОм]}.$$

Прежде чем вычислить значение коэффициента стабилизации, перейдем к конечным приращениям и преобразуем выражение (9) к виду:

$$\frac{\Delta U_{BX}}{\Delta U_H} = \frac{R_1 + R_{BX}}{R_1} + \frac{\alpha R_1}{Ar_3} = K'_{CT} \quad (10)$$

Приняв $r_{CT} = 40 \text{ Ом}$, подставляя численные значения параметров в (10), получим, что $K'_{CT} \approx 84$.

г) определим выходное сопротивление СН, дифференцируя выражение (1) по току нагрузки I_H как сложную функцию, заметив предварительно, что приращение тока нагрузки ΔI_H и приращение тока эмиттера ΔI_{E2} транзистора VT2 совпадают:

$$r_{ВЫХ} = \frac{dU_H}{dI_H} = \frac{dU_{CT}}{dI_H} + \frac{dU_{E3}}{dI_H} = \frac{dU_{CT}}{dI_{CT}} \frac{dI_{CT}}{dI_H} + \frac{dU_{E3}}{dI_H} = (1 + \frac{r_{CT}}{R_2}) \frac{dU_{E3}}{dI_H}. \quad (11)$$

Приращение напряжения U_{E3} обусловлено приращением тока коллектора транзистора VT1, которое, в основном, определяется требуемым приращением тока базы регулирующего элемента, а также изменением напряжения на входе РЭ за счет изменения выходного напряжения и напряжения база-эмиттер U_{E32} транзистора VT2:

$$dU_{E3}S = dI_E - dU_H/R_3 + dU_{E32}/R_3, \quad (12)$$

где $R_3 = R_1 || R_{BX}$; $dI_E = dI_H/(\beta + 1)$.

Выразив dU_{E3} из (12) и подставив его в (11), находим:

$$r_{ВЫХ} = \frac{\frac{R_1}{\beta + 1} + r_{E2}}{1 + \frac{\alpha(R_1 + R_{BX})/R_1 R_{BX}}{Ar_3}} = \frac{R_{ВЫХ.Р}}{1 + \frac{K_D \alpha R_3}{r_3}} = \frac{R_{ВЫХ.Р}}{1 + T_U}, \quad (13)$$

где $R_{ВЫХ.Р}$ — выходное сопротивление "разомкнутого", то есть не охваченного отрицательной обратной связью СН;

$T_U = K_D \alpha R_3/r_3$ — петлевое усиление СН.

Как видно из выражения (13), оно полностью совпадает с классическим для систем с отрицательной обратной связью.

Подставляя в (13) численные значения, находим, что $r_{ВЫХ} \approx 0,5 \text{ Ом}$.

д) найти абсолютное изменение выходного напряжения при $\Delta I_H = 30 \text{ мА}$ можно, зная выходное сопротивление СН: $\Delta U_H = r_{\text{вых}} \Delta I_H = 15 \text{ мВ}$.

е) оценим изменение выходного напряжения стабилизатора при изменении температуры от 20°C до 80°C . В справочнике [5] приводится относительная неустойчивость напряжения стабилизации стабилитрона, определяемая как

$$\alpha_t = \frac{\Delta U_{CT}}{U_{CT} \Delta T} 100 \%, \quad (14)$$

где T – абсолютная температура.

Поэтому скорость изменения напряжения стабилизации определим как

$$\frac{dU_{CT}}{dT} = \frac{\alpha_t U_{CT}}{100} \quad (15)$$

Дифференцируя (1) по температуре и воспользовавшись выражением (15), получаем:

$$\frac{dU_H}{dT} = \frac{dU_{CT}}{dT} + \frac{dU_{БЭ}}{dT} = \frac{dU_{БЭ}}{dT} + \frac{\alpha_t U_{CT}}{100} \quad (16)$$

Переходя к конечным приращениям, из выражения (16) находим:

$$\Delta U_H = \frac{dU_{БЭ}}{dT} \Delta T + \frac{\alpha_t U_{CT}}{100} \Delta T, \quad (17)$$

где ΔT – диапазон изменения температуры (в нашем случае – 60°C). Подставляя численные значения:

$$\alpha_t = 0,015 \text{ } \%/^\circ\text{C}, \text{ и } dU_{БЭ}/dT = -2 \text{ мВ}/^\circ\text{C},$$

получаем, что $\Delta U_H = 78 \text{ мВ}$.

Результаты компьютерного моделирования данной схемы приведены на рисунках 2 - 4. В качестве транзистора VT1 использована модель транзистора КТ3102В, а VT2 – КТ815В. Такая замена транзистора VT1 несущественно влияет на статические характеристики СН, так как эти транзисторы – кремниевые и близки по параметрам.

Из рисунка 2 видно, что при входном напряжении 10. В коэффициент стабилизации, рассчитанный по предложенной методике и полученный в результате моделирования, практически совпадают. Некоторое отличие выходного напряжения от расчетного обусловлено отличием от принятых в расчете напряжений на переходе база-эмиттер и стабилитроне, что нельзя

считать существенной ошибкой, поскольку она не превышает 3 %. Увеличение коэффициента стабилизации при увеличении входного напряжения обусловлено ростом тока через резистор R1 и, следовательно, возрастанием тока коллектора транзистора VT1. Это означает, что практически все параметры СН в той или иной мере режимно зависимые.

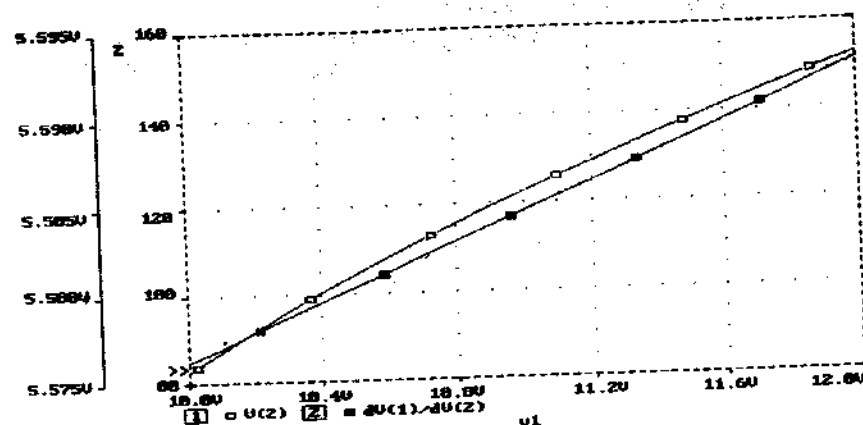


Рисунок 2- Зависимости выходного напряжения (кривая 1) и коэффициента стабилизации (кривая 2) от изменения входного напряжения стабилизатора

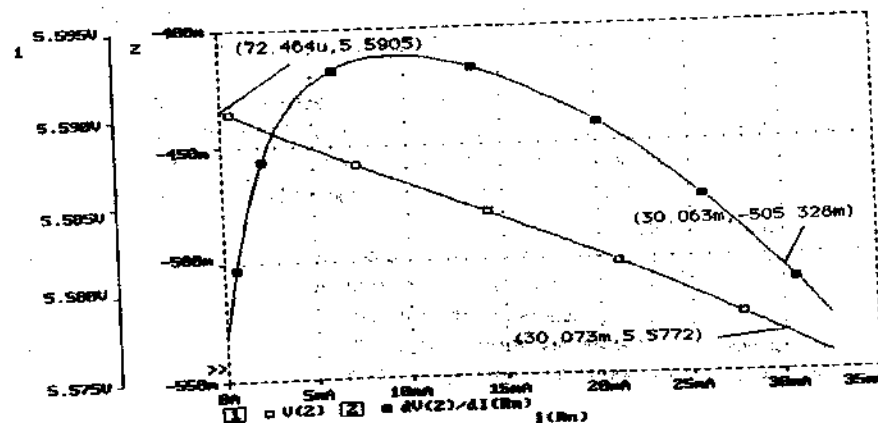


Рисунок 3- Зависимости выходного напряжения (кривая 1) и выходного сопротивления (кривая 2) от изменения тока нагрузки

На рисунке 3 приведена зависимость изменения выходного напряжения при изменении тока нагрузки от нуля до 30 мА (кривая 1). Абсолютное изменение

ние выходного напряжения составляет 15 мВ, что хорошо согласуется с расчетными данными. Выходное сопротивление (кривая и) — также режимно зависимый параметр. При отсутствии тока нагрузки $I_{вых}$ относительно велико, так как r_{32} имеет максимальное значение, а с ростом тока нагрузки r_{32} снижается. Но одновременно с этим уменьшается ток коллектора транзистора VT1, что ведет к снижению петлевого усиления и возрастанию выходного сопротивления. Отрицательные значения выходного сопротивления означают, что с ростом тока нагрузки выходное напряжение стабилизатора уменьшается. При токе нагрузки 30 мА результаты расчета и результаты моделирования практически совпадают.

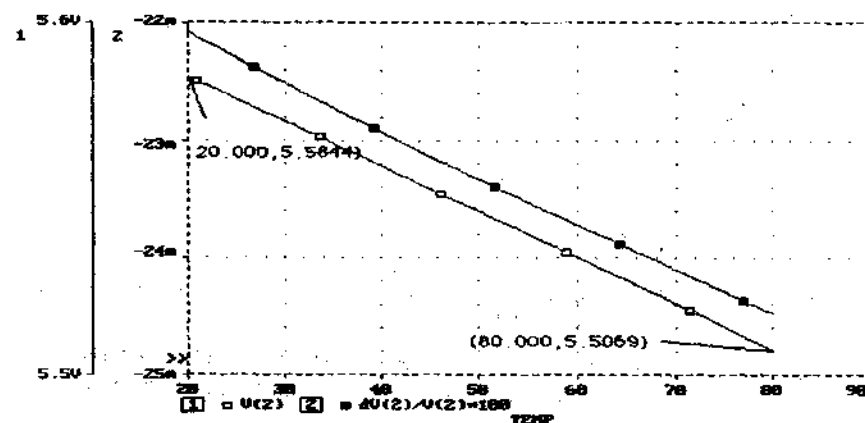


Рисунок 4-Температурная зависимость выходного напряжения (кривая 1) и температурного коэффициента α_1 (кривая 2)

Результаты моделирования схемы СН при изменении температурных условий приведены на рисунке 4. Абсолютное изменение напряжения на выходе СН при изменении температуры на 60 °С составляет 78,5 мВ, а температурный коэффициент $\alpha_1 \approx 0,0235 \text{ \%}/^\circ\text{C}$. (Результаты, представленные на рисунке 4, получены при токе нагрузки 30 мА).

Приведенные графики показывают хорошее согласование данных расчета и моделирования. Существующие незначительные различия можно отнести к тому, что при расчете делались некоторые допущения, а также к тому, что параметры некоторых активных компонентов в библиотеке системы схемотехнического моделирования несколько отличаются от справочных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном сборнике задач приводится большое количество достаточно простых и эффективных схем компенсационных и параметрических СН, источников опорного напряжения. Умение анализировать эти и подобные схемы позволяет выявить тенденции изменения характеристик СН, позволяет обнаружить противоречия, выявить достоинства и недостатки схемотехнических решений, указать пути их устранения. Хочется надеяться, что сборник задач принесет пользу не только в процессе обучения, но и в дальнейшей практической инженерной деятельности.

Наряду с умением анализировать схемы и доводить их до численного расчета целесообразно освоить пакет прикладных программ PSpice, являющийся мощным инструментом при схемотехническом проектировании различных радиоэлектронных устройств [4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Старченко Е.И. Стабилизаторы напряжения с непрерывным регулированием: Методическое пособие по самостоятельному изучению теоретической части курса «Аналоговые электронные устройства» для студентов специальности 2301 «Радиотехника». — Шахты: ШТИБО, 1992. — 24с.
2. Старченко Е.И., Манжула В.Г. Базовые матричные кристаллы. Схемотехника типовых аналоговых микросистемных устройств: Методическое пособие по изучению теоретической части дисциплины «Микросхемотехника» и «Аналоговые электронные устройства». — Шахты: ШТИБО, 1992. — 61с.
3. Соклофф С. Аналоговые интегральные схемы: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. — 583с.
4. Исаков А.Б., Манжула В.Г., Старченко Е.И. PSpice пользователь: Методическое пособие по самостоятельному изучению и использованию системы схемотехнического моделирования PSpice для студентов специальности 2301 «Радиотехника». — Шахты: ШТИБО, 1994. — 36с.
5. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам / Н.Н.Горюнов, А.Ю.Клейман, Н.В.Комков и др.; Под ред. Горюнова Н.Н. М.: Энергия, 1976. — 744с.