

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиоэлектронных средств

С. М. Боровиков

НАДЁЖНОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Методическое пособие
для студентов специальности
«Техническое обеспечение безопасности»

Минск 2007

УДК 621. 396. 6 – 192(075.8)

ББК 32.844 я 73

Б 83

Р е ц е н з е н т

проф. кафедры ЭВС БГУИР, канд. техн. наук И. М. Русак

Боровиков, С. М.

Б 83 Надёжность радиоэлектронных средств: метод. пособие для студ. спец. «Техническое обеспечение безопасности» / С. М. Боровиков. – Минск : БГУИР, 2007. – 48 с. : ил.

ISBN 978-985-488-187-4

Приводятся содержание учебной дисциплины «Надёжность радиоэлектронных средств», методические указания к изучению учебного материала, перечень контрольных вопросов по каждому разделу учебной дисциплины, задания к контрольной работе и методические указания по её выполнению.

УДК 621. 396. 6 – 192(075.8)

ББК 32.844 я 73

ISBN 978-985-488-187-4

© Боровиков С. М., 2007

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2007

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. РАЗДЕЛЫ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ	5
2. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К НИМ	5
2.1. Методические указания по изучению теоретического учебного материала.....	5
2.2. Контрольные вопросы.....	5
<i>Раздел 1. Основы теории надёжности.....</i>	<i>5</i>
<i>Раздел 2. Надёжность элементов изделий радиоэлектроники и приборостроения.....</i>	<i>14</i>
<i>Раздел 3. Оценка показателей надёжности проектируемых устройств.....</i>	<i>17</i>
<i>Раздел 4. Резервирование как метод повышения надёжности устройств.....</i>	<i>20</i>
<i>Раздел 5. Обеспечение надёжности устройств на этапе проектирования, производства и эксплуатации.....</i>	<i>23</i>
2.3. Вопросы для самопроверки.....	29
<i>К разделу 1.....</i>	<i>29</i>
<i>К разделу 2.....</i>	<i>30</i>
<i>К разделу 3.....</i>	<i>31</i>
<i>К разделу 4.....</i>	<i>33</i>
<i>К разделу 5.....</i>	<i>34</i>
3. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ, ИХ КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЁМ В ЧАСАХ.....	35
4. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА.....	36
4.1. Содержание контрольной работы.....	36
4.2. Исходные данные.....	36
4.3. Задание на расчётную часть работы.....	40
4.4. Методические указания по выполнению работы.....	40
4.5. Рекомендации по выполнению экспресс-анализа электрической схемы функционального узла.....	41
4.6. Оформление выполненной работы.....	44
ЛИТЕРАТУРА.....	45
ПРИЛОЖЕНИЕ. Варианты исходных данных для контрольной работы.....	47

ВВЕДЕНИЕ

Целью изучения дисциплины является знакомство с основами теории надёжности и методами оценки показателей надёжности технических изделий с ориентацией на элементы и устройства радиоэлектроники и приборостроения.

В результате изучения дисциплины студент должен **знать**:

- терминологию и основные понятия в области надёжности технических изделий;
- методы математического описания отказов, модели отказов, используемые на практике для элементов и устройств;
- суть количественных показателей, используемых на практике для описания надёжности элементов и устройств;
- сравнительную характеристику надёжности, в частности, безотказности типовых элементов изделий радиоэлектроники и приборостроения;
- математические модели пересчёта справочных значений интенсивностей отказов элементов на конкретный электрический режим и условия работы;
- применяемые на практике методы оценки показателей безотказности и ремонтпригодности устройств;
- методы повышения надёжности радиоэлектронных устройств;
- виды резервирования и область их применения.

Пройдя подготовку по дисциплине, студент должен **уметь**:

- находить справочные данные о показателях надёжности (безотказности, долговечности и сохраняемости) типовых элементов, пользуясь технической документацией – техническими условиями, ОСТами, каталогами и т.п.;
- в документации на устройства радиоэлектроники и приборостроения находить информацию о показателях надёжности и давать физическую трактовку значениям этих показателей;
- производить инженерный пересчёт справочных значений интенсивностей отказов элементов на конкретный электрический режим и температуру;
- выполнять оценку показателей надёжности проектируемых устройств с учётом внезапных отказов элементов;
- производить инженерный пересчёт справочных значений показателей долговечности (ресурса, срока службы) на конкретные электрический режим и температуру;
- осуществлять выбор метода прогнозирования для оценки индивидуальной безотказности элементов.

Общий объём учебной дисциплины для студентов дневной формы обучения составляет 102 ч, в том числе на лекции отводится 32 ч, лабораторные работы – 16 ч, практические занятия – 16 ч, на самостоятельную работу – 16 ч. Для студентов заочной формы обучения предусмотрен следующий объём часов: лекций – 6 ч, лабораторных работ – 8 ч, практических занятий – 4 ч,

самостоятельной работы – 80 ч. Итоговая форма отчётности по дисциплине – экзамен.

1. РАЗДЕЛЫ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Учебная дисциплина включает следующие разделы:

- основы теории надёжности;
- надёжность элементов изделий радиоэлектроники и приборостроения;
- оценка показателей надёжности проектируемых устройств;
- резервирование как метод повышения надёжности устройств;
- обеспечение надёжности устройств на этапах проектирования, производства и эксплуатации.

С подробным содержанием тем и вопросов, рассматриваемых в каждом разделе, можно ознакомиться в рабочей программе учебной дисциплины, помещенной на сайте университета (www.bsuir.unibel.by) в рубриках «Образование», «Факультеты», «Факультет компьютерного проектирования», «Кафедра РЭС».

2. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К НИМ

2.1. Методические указания по изучению теоретического учебного материала

В данном пособии формулируются контрольные вопросы, которые отражают содержание учебной дисциплины. Контрольные вопросы сгруппированы по разделам учебной дисциплины и выделены жирным шрифтом. По каждому вопросу даются ссылки на подразделы, пункты, страницы учебной литературы. Также указываются (при необходимости) номера рисунков, математических выражений, таблиц и примеров, с которыми нужно разобраться в первую очередь, изучая конкретный вопрос. Кроме того, на каждый вопрос даётся краткий ответ, задача которого – закрепить полученные знания на этапе повторения учебного материала.

Студентам необходимо вначале понять и осмыслить суть контрольных вопросов, используя рекомендованную учебную литературу, а затем ознакомиться с краткими ответами с целью закрепления знаний и умений. Только после этого следует попытаться дать ответы на вопросы для самопроверки (с. 29–35).

2.2. Контрольные вопросы

Раздел 1. Основы теории надёжности

1. Причины обострения проблемы надёжности радиоэлектронных устройств (РЭУ) [1, подразд. 5.1, с. 131].

В настоящее время проблема надёжности РЭУ заметно обострилась, прежде всего из-за того, что существенно усложнились в схмотехническом

отношении устройства и ужесточились условия, в которых эксплуатируется современная радиоэлектронная аппаратура.

2. Основные понятия и определения теории надёжности [1, подразд. 5.2, с. 131, 132; 2].

Основными понятиями теории надёжности являются понятия «надёжность» и «отказ».

Под надёжностью понимают свойство изделия сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции, в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Надёжность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения изделия и условий его применения может включать **безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость** или определенные сочетания этих свойств. Нередко под надёжностью в узком смысле слова понимают безотказность изделия.

Многие понятия и определения теории надёжности базируются на таких понятиях, как работоспособность и безотказность [5, 6].

Под работоспособным состоянием (кратко – **работоспособностью**) понимают состояние изделия, при котором оно способно выполнять предписанные ему функции, имея значения выходных параметров в пределах норм, оговоренных в технической документации.

Безотказность – свойство изделия непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки. Под **наработкой** в общем случае понимают продолжительность работы изделия, выраженную в часах, циклах переключения или других единицах в зависимости от вида и функционального назначения изделия. Например, для интегральной микросхемы наработка выражается в часах, для переключателя – в циклах переключения, для счетчика бета-излучения – в импульсах и т.д.

Долговечность – свойство изделия сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Ремонтпригодность – свойство изделия, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Сохраняемость – свойство изделия сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность изделия выполнять требуемые функции в течение и после хранения и (или) транспортирования.

3. Понятие отказа [1, подразд. 5.3, с. 133].

Под **отказом** понимают полную или частичную потерю изделием работоспособности вследствие ухода одного или нескольких параметров за пределы установленных норм.

4. Понятие наработки до отказа [1, подразд. 5.3, с. 133].

Под **наработкой до отказа** понимают суммарную наработку изделия от момента вступления в работу (эксплуатацию) до возникновения первого отказа.

Если наработка выражается временем, то это понятие называют **временем до отказа** или **временем безотказной работы**.

5. Классификация отказов [1, подразд. 5.3, с. 133, табл. 5.1; 7].

По характеру возникновения различают внезапные и постепенные отказы. **Внезапный отказ** (ранее называемый также мгновенным) – отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значения одного или нескольких параметров изделия. Под **постепенным** (ранее называемым также параметрическим) понимают отказ, возникающий в результате постепенного, обычно непрерывного и монотонного, изменения значения одного или нескольких параметров.

По причинам возникновения различают конструктивный, производственный, эксплуатационный и деградиационный отказы.

Под **конструктивным** понимают отказ, возникающий по причине несовершенства или нарушения установленных правил и (или) норм проектирования.

Производственным называют отказ, связанный с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта.

Эксплуатационным считается отказ, возникающий по причине нарушения установленных правил или условий эксплуатации.

Под **деградационным** понимают отказ, обусловленный естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении установленных правил и норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

6. Причины отказов устройств [1, подразд. 5.5, с. 135, табл. 5.2, 5.3].

На долю ошибок проектирования устройств приходится до 40...50 % всех отказов. Отказы из-за ошибок (дефектов) производства возникают в 30...40 % случаев. На долю ошибок оператора приходится (по зарубежным данным) примерно 20...30 % всех отказов устройств.

7. Схемы (модели) соединения элементов в устройстве с точки зрения надёжности [1, подразд. 5.4, с. 134, 135, рис. 5.1].

В теории и практике надёжности РЭУ различают три схемы (модели) соединения элементов **с точки зрения надёжности**: последовательная, параллельная, смешанная. Наиболее распространена последовательная схема (модель). Согласно этой модели отказ РЭУ возникает в случае отказа хотя бы одного из элементов устройства (рис. 2.1).

8. Модель отказа [1, подразд. 5.6, с. 136].

Под этой моделью понимают математическое выражение закона распределения, описывающее время до отказа.

9. Модели законов распределения времени до отказа,

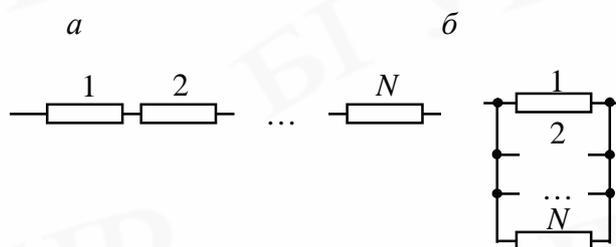


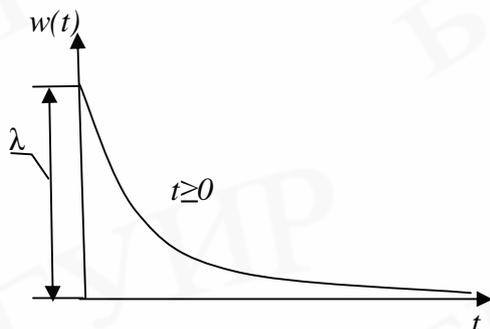
Рис. 2.1. Схемы (модели) соединения элементов в устройстве с точки зрения надёжности:
a – последовательное соединение;
б – параллельное соединение
(N – количество элементов в устройстве)

используемые для описания отказов [1, подразд. 5.6, с. 136–138].

Установлено, что в радиоэлектронике и приборостроении *время до отказа* элементов и устройств описывается следующими законами распределения: экспоненциальным; Вейбулла; нормальным; логарифмически нормальным.

10. Экспоненциальный закон распределения времени до отказа [1, подразд. 5.6, с.136].

В этом случае (рис. 2.2) плотность распределения времени до отказа t описывается выражением



$$w(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \lambda > 0, t \geq 0, \quad (2.1)$$

где λ – параметр распределения.

В теории и практике надёжности РЭУ часто употребляют термин «**экспоненциальный закон надёжности**», имея в виду, что время до отказа распределено по экспоненциальному закону.

Рис.2.2 Экспоненциальное распределение времени до отказа

11. Показатели надёжности

устройств и их элементов [1, подразд. 5.7, с. 138–141].

Надёжность является комплексным свойством изделия. Для описания различных сторон этого свойства на практике пользуются *показателями надёжности*, представляющими собой количественные характеристики одного или нескольких свойств, которые определяют надёжность изделия.

12. Единичные показатели надёжности [1, подразд. 5.7, с. 138].

Под *единичным* понимают такой показатель, который характеризует одно из свойств, составляющих надёжность изделия: безотказность, ремонтпригодность, долговечность, сохраняемость.

13. Комплексный показатель надёжности [1, подразд. 5.7, с. 138].

Комплексный показатель обобщённо характеризует несколько свойств из числа составляющих надёжность изделия: безотказность, ремонтпригодность, долговечность, сохраняемость.

14. Группы показателей надёжности [1, подразд. 5.7, с. 138–141].

Для количественного описания различных сторон надёжности как свойства обычно используют пять групп показателей: 1) показатели безотказности, 2) показатели ремонтпригодности, 3) показатели долговечности, 4) показатели сохраняемости, 5) комплексные показатели надёжности.

15. Показатели безотказности [1, подразд. 5.7, с. 139].

С их помощью получают представление о таком свойстве и составляющей надёжности, как безотказность. Показатели этой группы:

- вероятность безотказной работы за время t_3 , $P(t_3)$;
- вероятность отказа за время t_3 , $q(t_3)$;

- средняя наработка до отказа, T_{cp} . Если наработка выражается временем, то показатель называют средним временем безотказной работы;
- гамма-процентное время до отказа, T_γ ;
- интенсивность отказов, γ ;
- средняя наработка на отказ, кратко наработка на отказ, T_0 .

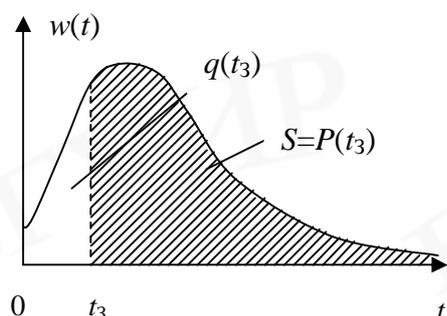
15.1. Вероятность безотказной работы [1, подразд. 5.8, с. 141–143].

Под вероятностью безотказной работы изделия за время t_3 понимают вероятность (Вер) вида

$$P(t_3) = \text{Вер}\{T \geq t_3\}, \quad (2.2)$$

где T – случайное время безотказной работы изделия (время до отказа).

Если известна функция плотности распределения времени безотказной работы $w(t)$, то вероятность безотказной работы изделия за время t_3 (рис. 2.3) может быть определена как



$$P(t_3) = \int_{t_3}^{\infty} w(t) dt. \quad (2.3)$$

Для экспоненциального распределения времени безотказной работы, используя выражения (2.3) и (2.1), можно получить

Рис. 2.3. К определению вероятности безотказной работы и вероятности отказа

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (2.4)$$

Эту формулу широко применяют в инженерных расчётах. Она также известна как *экспоненциальный закон надёжности*.

15.2. Вероятность отказа [1, подразд. 5.8, с. 138–141].

Безотказная работа изделия и его отказ – события противоположные, составляющие полную группу событий. Поэтому вероятность отказа изделия за произвольное время t описывается выражением

$$q(t) = 1 - P(t). \quad (2.5)$$

С другой стороны, вероятность отказа можно представить как

$$q(t) = \text{Вер}\{T < t\} = F(t), \quad (2.6)$$

где $F(t)$ – функция распределения (интегральный закон) времени до отказа, найденная для времени t .

Для вероятности отказа за время t_3 (см. рис. 2.3) справедливо выражение

$$q(t_3) = \int_0^{t_3} w(t) dt. \quad (2.7)$$

15.3. Среднее время безотказной работы [1, подразд. 5.11, выражение (5.18)].

Надёжность однотипных устройств или элементов с точки зрения продолжительности их работы до первого отказа оценивается *средним временем безотказной работы*, под которым понимают математическое ожидание случайного времени безотказной работы.

15.4. Гамма-процентная наработка до отказа [1, подразд. 5.7, с. 140].

Под ней понимают наработку, в течение которой отказ в изделии не возникнет с вероятностью γ , выраженной в процентах, т.е. это минимальная наработка до отказа, которую будут иметь γ процентов изделий данного вида. Например, запись в технической документации: «90-процентная наработка до отказа составляет не менее 250 ч» означает, что у 90 % изделий данного вида в течение суммарной наработки, равной 250 ч, отказ не возникнет.

15.5. Нарботка на отказ [1, подразд. 5.10, рис. 5.1, выражение 5.16].

Под *наработкой на отказ* понимают величину, определяемую как

$$T_0 = \sum_{i=1}^m t_i / m, \quad (2.8)$$

где m – число отказов устройства, возникших за рассмотренный календарный период, или, что то же самое, число периодов безотказной работы.

Из выражения (2.8) следует, что T_0 есть математическое ожидание времени безотказной работы между двумя соседними отказами одного и того же устройства.

Показатель T_0 имеет физический смысл только применительно к восстанавливаемым устройствам. Его более полно называют *средней наработкой на отказ* – см. выражение (2.8).

15.6. Интенсивность отказов [1, подразд. 5.9, с. 143–144].

Под ней понимают условную плотность времени до отказа изделия, определяемую при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник. Для элементов эта характеристика является основной справочной характеристикой надёжности, в частности безотказности.

15.7. Лямбда-характеристика устройств [1, подразд. 5.9, с. 144].

Зависимость интенсивности отказов изделий от времени в технике

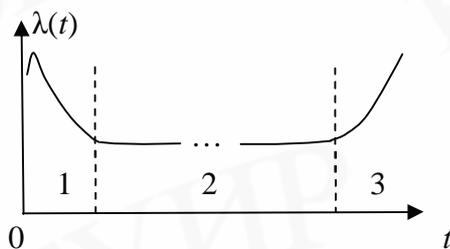


Рис. 2.4. Типичный вид λ -характеристики РЭУ

называется λ -характеристикой. Типичный вид λ -характеристики РЭУ показан на рис. 2.4.

На λ -характеристике можно чётко выделить три области: **1 – период приработки**, **2 – период нормальной эксплуатации**, **3 – область старения**.

Инженерные расчёты надёжности устройств обычно выполняются для периода нормальной эксплуатации. Продолжительность данного периода составляет тысячи–десятки тысяч часов.

16. Показатели ремонтпригодности [1, подразд. 5.7, с. 139].

С их помощью получают представление о таком свойстве и составляющей надёжности, как ремонтпригодность. Показателями ремонтпригодности являются следующие:

- вероятность восстановления изделия $v(\tau)$ за заданное время τ ;
- среднее время восстановления (математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния изделия после отказа), T_B ;
- гамма-процентное время восстановления, τ_γ .

16.1. Вероятность восстановления [1, подразд. 5.13, с. 147, 148].

Под **вероятностью восстановления** за заданное время τ_3 понимают вероятность вида

$$v(\tau_3) = \text{Вер}\{T \leq \tau_3\}, \quad (2.9)$$

где T – случайное время восстановления изделия.

Формулы для подсчета значений вероятности $v(\tau_3)$ зависят от закона распределения времени восстановления. Вероятность восстановления может быть определена как

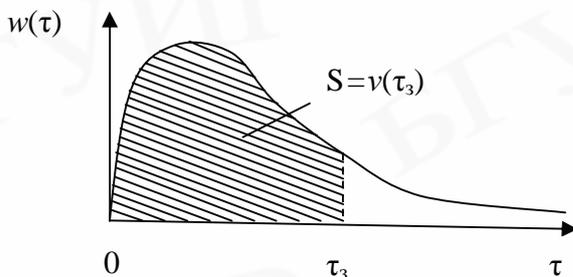


Рис. 2.5. К вопросу об определении величины $v(\tau_3)$

$$v(\tau_3) = \int_0^{\tau_3} w(t) dt. \quad (2.10)$$

Графическую интерпретацию выражения (2.10) можно понять из

рис. 2.5.

16.2. Среднее время восстановления [1, подразд. 5.13, с. 147, 148].

Под ним понимают математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния РЭУ после отказа. Значение T_B показывает, сколько в среднем затрачивается времени на обнаружение и устранение одного отказа.

16.3. Гамма-процентное время восстановления.

Под ним понимают время восстановления, гарантируемое с вероятностью «гамма», выраженной в процентах. Например, запись в технической документации «95-процентное время восстановления составляет не более 5 ч» означает, что для изделий данного вида в 95 % случаев время восстановления составит не более 5 ч.

17. Показатели долговечности [1, подразд. 5.7, с. 139, 140].

О долговечности как свойстве и составляющей надёжности изделий судят с помощью таких временных понятий, как ресурс и срок службы.

17.1. Ресурс [1, подразд. 5.7, с. 140].

Это суммарная наработка изделия от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

17.2. Предельное состояние [1, подразд. 5.7, с. 140].

Под **предельным** понимают такое состояние изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо при котором восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Критерии предельного состояния изделия устанавливаются в нормативно-технической или проектной документации.

17.3. Срок службы [1, подразд. 5.7, с. 140].

Это календарная продолжительность от начала эксплуатации изделия или её возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

17.4. Средний ресурс (средний срок службы) [1, подразд. 5.7, с. 140].

Под ним понимают математическое ожидание ресурса (срока службы) изделия данного вида.

17.5. Гамма-процентный ресурс (срок службы) [1, подразд. 5.7, с. 140].

Это ресурс (срок службы), который обеспечивается с вероятностью γ , выраженной в процентах, т.е. это ресурс (срок службы), который будут иметь гамма процентов изделий данного вида.

17.6. Назначенный ресурс, назначенный срок службы.

Они являются эксплуатационно-техническими характеристиками, связанными с долговечностью. Это такой ресурс (срок службы), по достижении которого изделие снимается с эксплуатации независимо от его технического состояния. Эти показатели устанавливают для устройств, на которые возлагаются ответственные функции.

17.7. Установленный ресурс, установленный срок службы.

Также являются эксплуатационно-техническими характеристиками, связанными с долговечностью. Под ними понимают ресурс (срок службы), который гарантируется с вероятностью, равной единице. Эти характеристики имеют физический смысл и используются только для восстанавливаемых устройств.

18. Показатели сохраняемости [1, подразд. 5.7, с. 140].

С их помощью получают представление о таком свойстве и составляющей надёжности, как сохраняемость. Показателями этой группы являются:

- средний срок сохраняемости;
- гамма-процентный срок сохраняемости.

18.1. Срок сохраняемости [1, подразд. 5.7, с. 140]

Это календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования изделия, в течение которой сохраняются в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность изделия выполнять заданные функции.

18.2. Гамма-процентный срок сохраняемости [1, подразд. 5.7, с. 140].

Гамма-процентный срок сохраняемости – срок сохраняемости, достигаемый изделием с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах, т.е. это минимальный срок сохраняемости, который будут иметь γ процентов изделий данного вида.

18.3. Срок хранения.

В технической документации на изделия иногда вместо показателей, описывающих срок сохраняемости, приводятся показатели, описывающие срок хранения: средний срок хранения, гамма-процентный срок хранения. Эти показатели практически совпадают с аналогичными показателями, которые указывают на срок сохраняемости, так как составляющая транспортирования обычно невелика по сравнению с временем хранения.

19. Эксплуатационные коэффициенты надёжности [1, подразд. 5.14, с. 148–150].

Относятся к комплексным показателям надёжности, т.е. показателям, характеризующим несколько свойств, составляющих надёжность РЭУ. Распространены показатели (коэффициенты), с помощью которых обобщённо получают представление о двух свойствах: безотказности и ремонтпригодности.

Широко используют следующие коэффициенты:

- коэффициент готовности, K_{Γ} ;
- коэффициент оперативной готовности в течение времени t_3 , $K_{o.g.}(t_3)$;
- коэффициент технического использования, $K_{\text{т}}$;
- коэффициент простоя (по вине отказов), $K_{\text{п}}$.

19.1. Коэффициент готовности [1, подразд. 5.14, с. 149].

Под *коэффициентом готовности* K_{Γ} понимают вероятность того, что РЭУ окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение РЭУ по назначению не предусматривается.

Количественно коэффициент готовности можно подсчитать по формуле

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\left(\sum_{i=1}^m t_i + \sum_{i=1}^m \tau_i \right)}, \quad (2.11)$$

где t_i – время безотказной работы между $(i-1)$ - и i -м отказом;

τ_i – время восстановления i -го отказа;

m – количество отказов за рассматриваемый период.

19.2. Коэффициент оперативной готовности [5].

Под ним понимают вероятность того, что в произвольный момент времени РЭУ окажется в работоспособном состоянии и, начиная с этого момента времени, будет работать безотказно в течение времени t_3 .

Для коэффициента $K_{o.g.}(t_3)$ справедливо выражение

$$K_{o.g.}(t_3) = K_{\Gamma} P(t_3), \quad (2.12)$$

где $P(t_3)$ – вероятность безотказной работы изделия за время t_3 .

В технической и учебной литературе прошлых лет коэффициент $K_{o.g.}(t_3)$ назывался вероятностью нормального функционирования за время t_3 .

19.3. Коэффициент технического использования [1, подразд. 5.14, с. 149, 150].

Физически коэффициент $K_{\text{и}}$ характеризует долю времени нахождения РЭУ в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации. Количественно коэффициент $K_{\text{и}}$ может быть подсчитан по формуле

$$K_{\text{и}} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\left(\sum_{i=1}^m t_i + \sum_{i=1}^m t_{\text{п}i} \right)}, \quad (2.13)$$

где $t_{\text{п}i}$ – время вынужденного простоя после i -го отказа.

Время $t_{\text{п}i}$ в общем случае включает время на обнаружение и устранение отказа, регулировку и настройку РЭУ, время простоя из-за отсутствия запасных элементов, время на проведение профилактических работ и др.

19.4. Коэффициент простоя (по вине отказов) [1, подразд. 5.14, с. 149, 150].

Коэффициент простоя $K_{\text{п}}$ характеризует расход времени на различные непроизводительные затраты и определяется как отношение суммарного времени вынужденных простоев к общему времени безотказной работы и вынужденных простоев за этот же период эксплуатации:

$$K_{\text{п}} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{\text{п}i}}{\left(\sum_{i=1}^m t_i + \sum_{i=1}^m t_{\text{п}i} \right)}. \quad (2.14)$$

В общем случае в суммарное время простоя входят все непроизводительные затраты времени, исключая время хранения и нахождения в резерве.

Можно показать, что справедливо выражение

$$K_{\text{и}} = 1 - K_{\text{п}}. \quad (2.15)$$

Раздел 2. Надёжность элементов изделий радиоэлектроники и приборостроения

1. Интенсивность отказов как основная характеристика надёжности элементов [1, п. 15.15.1, с. 150–153].

При расчёте показателей надёжности устройств надо располагать справочными данными о показателях надёжности элементов.

В настоящее время основной справочной характеристикой надёжности (в частности безотказности) элементов, приводимой в технических условиях или других технических документах, является интенсивность отказов λ . Она принимается постоянной в течение определённой наработки, также указываемой в технической документации.

2. Размерность интенсивности отказов элементов [1, п. 5.15.1, с. 150–153].

Размерность интенсивности отказов $[\lambda] = 1/\text{ч} = \text{ч}^{-1}$.

Интенсивность отказов современных элементов занимает диапазон примерно $10^{-10} \dots 10^{-5}$ 1/ч [1, прил. 2, с. 307–310].

За рубежом в качестве размерности величины λ используют также процент на 1000 ч работы, что равносильно введению для λ множителя 10^5 . В последнее время для высоконадёжных элементов радиоэлектроники в качестве размерности λ стали использовать фит: 1фит = 10^{-9} 1/ч.

3. Коэффициент электрической нагрузки элементов [1, п. 5.15.2, выражение (5.31)].

Надёжность элементов зависит от коэффициентов электрической нагрузки, характеризующих степень электрической нагруженности элементов относительно их номинальных или предельных возможностей, указываемых в ТУ.

Количественно коэффициенты электрической нагрузки (часто говорят – коэффициенты нагрузки) определяют по соотношению

$$K_n = F_{\text{раб}} / F_{\text{ном}}, \quad (2.16)$$

где $F_{\text{раб}}$ – электрическая нагрузка элемента в рабочем режиме, т.е. фактическая нагрузка на рассматриваемом схемном элементе;

$F_{\text{ном}}$ – номинальная или предельная по ТУ электрическая нагрузка элемента, выполняющего в конструкции функцию схемного элемента.

4. Выбор характеристики F , используемой для определения коэффициента нагрузки [1, п. 5.15.3, с. 153,154, табл. 5.4].

В качестве нагрузки F выбирают такую электрическую характеристику элемента (одну или несколько), которая в наибольшей степени влияет на его надёжность. Например, для резисторов в качестве характеристики берут мощность рассеивания, для конденсаторов – напряжение, прикладываемое к обкладкам. Применительно к биполярным транзисторам можно говорить о коэффициентах нагрузки по току, по напряжению, по мощности.

5. Задание справочных значений интенсивности отказов элементов.

Справочное значение интенсивности отказов λ_0 для элементов соответствует коэффициенту нагрузки $K_n = 1$ и нормальным (лабораторным) условиям эксплуатации. Для этих условий температура $t = 20 \pm 5$ °С, относительная влажность $B = 65 \pm 15$ % и т.д.

6. Особенность задания интенсивности отказов для элементов коммутации [1, п. 5.15.4, с. 156].

Интенсивность отказов λ_0 для элементов коммутации в технической документации может задаваться иначе, нежели для других элементов (резисторов, транзисторов, интегральных микросхем и т.д.), а именно:

- для тумблеров, кнопок, реле и т.п. – значением λ , приходящимся на один контакт при номинальном токе через контакт;
- для переключателей – значением λ , приходящимся на одну контактную группу при номинальном токе через контакты;

- для соединителей (разъёмов) – значением λ , приходящимся на один штырь разъёма при номинальном токе через штырь;
- для монтажных и соединительных проводов, кабелей – значением λ , приходящимся на каждый метр длины при номинальной плотности тока в проводе.

7. Характеристика надёжности типовых элементов [1, п. 5.15.4, с. 155, 156].

При прочих равных условиях менее надёжными являются элементы, имеющие механические контакты (элементы коммутации, переменные и подстроечные резисторы и т.п.), а также мощные полупроводниковые приборы и приборы СВЧ-диапазона. Надёжность интегральных микросхем (ИМС) слабо зависит от степени интеграции, т.е. числа элементов в ИМС. Объясняется это тем, что значительный вклад в ненадёжность ИМС вносят корпус и межсоединения.

8. Учёт влияния на надёжность элементов электрического режима и условий работы [1, п. 5.15.5, с. 156–158, выражение (5.32), рис. 5.13].

На практике с целью повышения надёжности РЭУ коэффициенты нагрузки элементов K_H выбирают меньше единицы. Условия работы элементов оказываются более жесткими, нежели нормальные. Возникает задача пересчёта справочных значений интенсивностей отказов λ_0 на конкретный электрический режим (значения K_H) и условия работы.

В настоящее время для определения λ с учётом эксплуатационных факторов (обозначим эту величину как $\lambda(v)$, где символ v подчеркивает учёт эксплуатационных факторов) наиболее часто используют выражение (модель) вида

$$\lambda(v) = \lambda_0 \prod_{i=1}^m \alpha(x_i), \quad (2.17)$$

где $\alpha(x_i)$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние фактора x_i .

В качестве факторов x_i могут рассматриваться коэффициент нагрузки K_H , температура, давление, характер электрического режима и т.д.

9. Инженерный пересчёт справочных значений интенсивностей отказов элементов на конкретный электрический режим [1, п. 5.15.5, с. 157, 158, выражение (5.33)].

Электрический режим работы элемента учитывают с помощью коэффициента нагрузки K_H . Значение λ_0 , пересчитанное на коэффициент нагрузки $\lambda(K_H)$, определяют, используя примерное равенство

$$\lambda(K_H) \approx \lambda_0 \cdot K_H^b, \quad (2.18)$$

где b – показатель степени, зависящий от вида и типа элемента ($b \approx 3...5$ для конденсаторов; $b \approx 1...2$ – для других элементов);

λ_0 – справочное значение интенсивности отказов (соответствует $K_H = 1$ и $t = 20 \pm 5$ °C).

10. Инженерный пересчёт справочных значений интенсивностей отказов элементов на конкретную температуру.

Для инженерного пересчёта можно пользоваться выражением

$$\lambda(t) = \lambda_0 e^{\alpha(t-t_H)}, \quad (2.19)$$

где $\lambda(t)$ – справочное значение λ_0 , пересчитанное на температуру t ;

α – коэффициент, $\alpha = 0,01 \dots 0,03$, худший случай с точки зрения увеличения λ соответствует значению $\alpha = 0,03$;

t – температура корпуса элемента;

t_H – номинальная температура, в качестве её принимают значение $t_H = +25$ °С.

Формулой (2.19) можно пользоваться для всех видов элементов, кроме тех, рабочим материалом которых является изоляция (конденсаторы, катушки индуктивности). Для последних элементов при пересчёте λ лучше пользоваться «правилом десяти градусов», согласно которому характеристика надёжности элементов ухудшается в два раза на каждые десять градусов повышения температуры. С учётом этого рабочая формула может быть представлена в следующем виде:

$$\lambda(t) = \lambda_0 2^{0,1(t-t_H)}. \quad (2.20)$$

Формулами (2.19) и (2.20) следует пользоваться тогда, когда нет других, более точных данных.

Раздел 3. Оценка показателей надёжности проектируемых устройств

1. Основное расчётное соотношение для вероятности безотказной работы устройства [1, подразд. 5.16, с. 158, рис. 5.14, выражения (5.34) и (5.36)].

Вероятность безотказной работы устройства $P_{\Sigma}(t_3)$ за заданное время t_3 находят, используя выражение

$$P_{\Sigma}(t_3) = p_1(t_3) \cdot p_2(t_3) \dots p_N(t_3) = \prod_{i=1}^N p_i(t_3), \quad (2.21)$$

где N – количество элементов в устройстве;

$p_i(t_3)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента, подсчитанная для времени t_3 , $i = 1, \dots, N$.

Выражение соответствует предположению, что элементы в устройстве с точки зрения надёжности соединены последовательно (см. рис. 2.1). Кроме того, отказы элементов считают случайными и независимыми друг от друга.

В случае экспоненциального закона надёжности элементов

$$P_{\Sigma}(t_3) = e^{-\lambda_1 t_3} \cdot e^{-\lambda_2 t_3} \dots e^{-\lambda_N t_3} = e^{-t_3 \sum_{i=1}^N \lambda_i}, \quad (2.22)$$

где λ_i – параметр экспоненциального распределения для i -го элемента, численно равный интенсивности его отказов.

Из выражения (2.22) видно, что расчёт показателя безотказности $P_{\Sigma}(t_3)$ сводится к определению величины

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \lambda_i, \quad (2.23)$$

называемой суммарной интенсивностью отказов элементов устройства.

2. Основное расчётное соотношение для показателя ремонтпригодности [1, подразд. 5.16, рис. 5.14, выражения (5.37) и (5.38), с. 159].

Для среднего времени восстановления радиоэлектронного устройства может быть получено выражение

$$T_B = \frac{\sum_{i=1}^N q_i \tau_i}{\sum_{i=1}^N q_i} = \left. \begin{array}{l} \text{при } \lambda_i \cdot t_3 \ll 1 \\ q_i = q_i(t_3) \approx \lambda_i \cdot t_3 \end{array} \right| \approx \frac{t_3 \sum_{i=1}^N \lambda_i \tau_i}{t_3 \sum_{i=1}^N \lambda_i} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \tau_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}, \quad (2.24)$$

где q_i – вероятность отказа i -го элемента, подсчитанная для времени t_3 ;

τ_i – среднее время восстановления i -го элемента (значения этих величин можно найти в справочниках для различных видов элементов и классов аппаратуры) [1, прил. 4, с. 316].

3. Методы расчёта показателей надёжности устройств [1, подразд. 5.17, с. 159].

Существующие методы расчёта показателей надёжности РЭУ различаются степенью точности учёта электрического режима и условий работы элементов в составе устройства.

4. Ориентировочный (приближенный) расчёт показателей надёжности проектируемых РЭУ [1, подразд. 5.17, выражения (5.39)–(5.43), с. 159–162; подразд. 5.19, пример 5.2, с. 164–166].

При ориентировочном расчёте учёт электрического режима и условий работы элементов выполняется приближенно с помощью обобщенного эксплуатационного коэффициента. Значение этого коэффициента зависит от вида РЭУ и условий его эксплуатации.

Суммарную интенсивность отказов элементов РЭУ с учётом электрического режима и условий эксплуатации определяют как

$$\lambda_{\Sigma}(v) = \lambda_{\Sigma} \cdot K_{\vartheta} = K_{\vartheta} \cdot \sum_{j=1}^k \lambda_{0j} \cdot n_j, \quad (2.25)$$

где λ_{0j} – среднегрупповое значение интенсивности отказов элементов j -й группы, найденное с использованием справочников, $j=1, \dots, k$;

k – число сформированных групп однотипных элементов;

n_j – количество элементов в j -й группе, $j=1, \dots, k$;

K_s – обобщенный эксплуатационный коэффициент, выбираемый по таблицам в зависимости от вида РЭУ и (или) условий его эксплуатации [1, табл. 5.5, с. 161].

5. Уточнённый расчёт показателей надёжности (расчёт показателей надёжности проектируемых РЭУ с учётом коэффициентов электрической нагрузки и условий работы элементов в составе устройств) [1, подразд. 5.18, выражения (5.44)–(5.46), с. 162–164; подразд. 5.19, пример 5.3, с. 166–172].

Расчёт выполняется при тех же допущениях, что и ориентировочный. Однако электрический режим и условия работы элементов учитываются более точно и, кроме того, принимаются во внимание конструктивные элементы устройства (шасси, корпус, провода и т.п.).

Суммарную интенсивность отказов элементов с учётом коэффициентов электрической нагрузки и условий их работы в составе устройства $\lambda_{\Sigma}(v)$ находят как

$$\lambda_{\Sigma}(v) = \sum_{j=1}^k n_j \cdot \lambda_j(v), \quad (2.26)$$

где k – число сформированных групп однотипных элементов, в предельном случае каждый элемент РЭУ может составить отдельную группу;

n_j – количество элементов в j -й группе, $j=1, \dots, k$;

$\lambda_j(v)$ – интенсивность отказов элементов j -й группы с учётом электрического режима и условий работы, определяемая по выражению

$$\lambda_j(v) = \lambda_{0j} \prod_{i=1}^m \alpha(x_i). \quad (2.27)$$

Здесь λ_{0j} – справочное значение интенсивности отказов элементов j -й группы, $j=1, \dots, k$;

$\alpha(x_i)$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние фактора x_i , $i=1, \dots, m$;

m – количество факторов, принимаемых во внимание.

6. Влияние цикличности работы на безотказность РЭУ [8].

Для значительной части РЭУ имеет место циклический характер работы, т.е. по истечении некоторой наработки изделие выключается, а через некоторое время снова может быть включено. Процессы включения и выключения РЭУ могут существенно сказаться на реальной безотказности устройств.

Замечено, что цикличность существенно сказывается на надёжности при частоте циклов работы $F_{ц} \geq 1$ цикл/час.

$$F_{ц} = N_{ц}/t, \quad (2.28)$$

где $N_{ц}$ – количество циклов (включено–выключено) за рассматриваемый календарный период;

t – календарный промежуток времени, в течение которого выбирается заданная наработка (время работы) t_3 .

7. Расчёт показателей надёжности РЭУ при разных законах распределения времени до отказа элементов [1, подразд. 5.20, с. 172–175].

Для расчёта пользуются выражением

$$P_{\Sigma}(t_3) = p_1(t_3)p_2(t_3)\dots p_N(t_3), \quad (2.29)$$

но при этом вероятности вида $p_i(t_3)$ находят с учётом закона распределения времени до отказа i -го элемента.

8. Понятие параметрической надёжности устройств [1, п. 5.21.1, с. 176].

Под *параметрической надёжностью* понимают свойство изделия, состоящее в отсутствии в нём постепенных отказов при работе в заданных условиях эксплуатации в течение времени t_3 . Понятие параметрической надёжности прямо связано с понятием постепенных отказов.

9. Причины появления постепенных отказов [1, п. 5.21.2, с. 176, 177].

Основными причинами, вызывающими появление постепенных отказов устройств, являются:

- производственный разброс выходного параметра устройства, вызываемый действием производственных погрешностей параметров элементов;
- отклонения выходного параметра от номинального значения под воздействием дестабилизирующих факторов (температуры, влажности и т.д.);
- уход выходного параметра от номинального значения из-за процессов старения элементов.

Ввиду наличия производственного (технологического) разброса параметров элементов выходной параметр устройства может заметно отклониться от номинального значения. В процессе эксплуатации, а также под воздействием дестабилизирующих факторов может происходить дальнейшее изменение выходного параметра. В итоге его значение может достигнуть критической границы и затем выйти за неё. Наступит постепенный отказ.

10. Оценка параметрической надёжности [1, подразд. 5.22, с. 177–185, рис. 5.19, выражение (5.52)].

Пусть допуск на выходной параметр y задан, исходя из служебного назначения РЭУ, нижней $y_{н}$ и верхней $y_{в}$ границами. Тогда вероятность, с которой

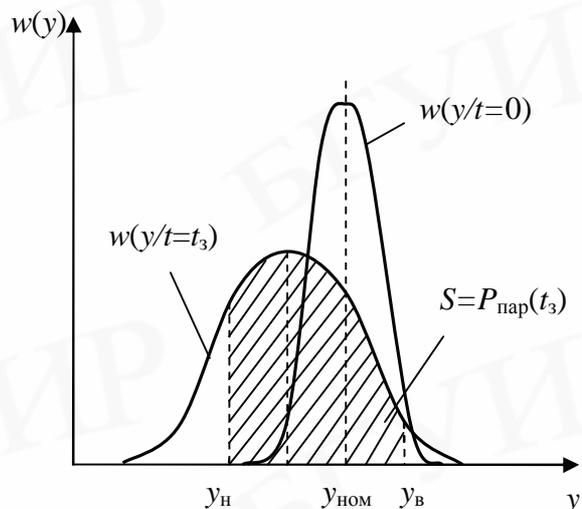


Рис. 2.6. Влияние процесса эксплуатации на распределение выходного параметра РЭУ:
 $y_{н}$, $y_{в}$ – нижняя и верхняя допустимые границы

гарантируется отсутствие постепенного отказа в течение промежутка времени $(0 \dots t_3) P_{\text{пар}}(t_3)$, численно равна заштрихованной площади на рис. 2.6.

Раздел 4. Резервирование как метод повышения надёжности устройств

1. Понятие резервирования [1, подразд. 5.26, с. 194, 195].

Резервирование – это введение в структуру устройства дополнительного числа элементов, цепей и (или) функциональных связей по сравнению с минимально необходимыми для функционирования устройства. Цель резервирования – повысить надёжность устройства.

2. Виды резервирования [1, подразд. 5.26, с. 194, 195, рис. 5.24–5.26].

В зависимости от того, как подключаются резервные элементы в случае отказа основных, различают следующие виды резервирования: постоянное, замещением, скользящее (может рассматриваться как частный случай резервирования замещением).

В зависимости от того, какая часть РЭС резервируется, различают общее (рис. 2.7) и отдельное (поэлементное) резервирование (рис. 2.8). При

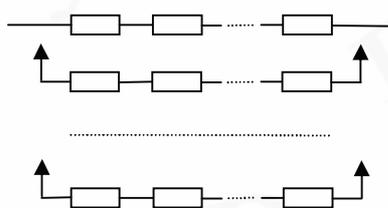


Рис. 2.7. Общее резервирование

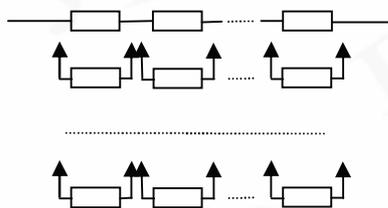


Рис. 2.8. Раздельное (поэлементное) резервирование

рассмотрении резервирования под словом «элемент» следует понимать как комплектующий элемент, так и каскад, функциональный узел, блок и т.д., имея в виду, что резервирование может выполняться на уровне различных частей РЭС.

3. Постоянное резервирование [1, подразд. 5.26, с. 195].

При постоянном резервировании резервные элементы постоянно подключены к основным и находятся в одинаковом с ними электрическом режиме. Деление элементов на основные и резервные носит здесь условный характер. Возможны два случая этого

резервирования. Первый случай – отказ одного из элементов резервируемого узла никак не сказывается на работе оставшихся элементов, второй – отказ одного из элементов резервируемого узла может сказаться на работе оставшихся элементов. В этом случае принципиальным является характер отказа элемента: короткое замыкание или отказ.

4. Резервирование замещением [1, подразд. 5.26, с. 195].

При резервировании замещением основной элемент в случае его отказа отключается от электрической цепи, обычно как по выходу, так и по входу, и вместо него подключается один из резервных элементов.

Переключение может выполняться либо автоматически с помощью переключающих устройств, либо вручную.

5. Общее резервирование [1, подразд. 5.26, с. 195].

При общем резервировании устройство резервируется в целом (рис. 2.7).

6. Раздельное резервирование [1, подразд. 5.26, с. 195].

При раздельном резервировании РЭС резервируется по частям (рис. 2.8).

7. Основная количественная характеристика резервирования [1, подразд. 5.29, с. 201].

Основной характеристикой резервирования является краткость резерва [5], выражаемая несокращенной дробью и определяемая отношением

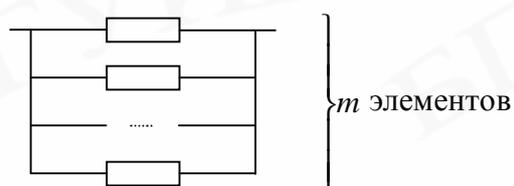


Рис. 2.9. Параллельный способ соединения элементов резервируемого узла

$$R = \frac{r}{n}, \quad (2.30)$$

где r – количество резервных элементов;

n – количество основных элементов, резервируемых резервными элементами.

8. Способы соединения элементов резервируемого узла при постоянном резервировании (случай принципиальности характера отказа элемента: короткое замыкание или отказ)

[1, подразд. 5.27, с. 196, 197, рис. 5.27–



Рис. 2.10. Последовательный способ соединения элементов резервируемого узла

5.29].

Различают следующие способы соединения элементов резервируемого узла:

1. Параллельный. Такой способ соединения используется в случае преобладания отказов типа «обрыв», например для резисторов (рис. 2.9).

2. Последовательный. Этот способ применяется тогда, когда преобладают отказы типа «короткое замыкание», например для конденсаторов (рис. 2.10).

3. Смешанный. Такой способ применяется тогда, когда отказы типа «обрыв» и типа «короткое замыкание» примерно равновероятны, например для полупроводниковых диодов (рис. 2.11).

9. Оценка показателей безотказности устройства при наличии постоянного резервирования (случай принципиальности характера отказа элемента) [1, подразд. 5.28].

Анализ безотказности выполняют, основываясь на том, что для каждого элемента резервируемого узла справедливо выражение

$$p + q_0 + q_{кз} = 1, \quad (2.31)$$

где p – вероятность безотказной работы;
 q_0 – вероятность отказа типа «обрыв»;
 $q_{кз}$ – вероятность отказа типа «короткое замыкание».

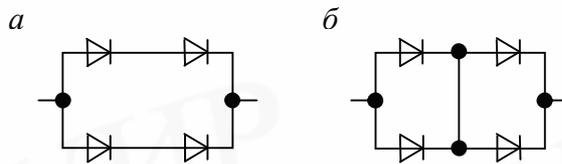


Рис. 2.11. Примеры смешанного соединения элементов резервируемого узла:
a – последовательно-параллельная схема;
б – параллельно-последовательная схема

10. Достоинства и недостатки постоянного резервирования (случай принципиальности характера отказа элемента) [1, подразд. 5.27, с. 196].

Основными достоинствами постоянного резервирования являются простота технической реализации и отсутствие даже кратковременного перерыва в работе в случае отказа элементов резервируемого узла. Это особенно важно для вычислительной техники и устройств цифровой обработки информации.

Основные недостатки постоянного резервирования (случай принципиальности характера отказа элементов):

- 1) меньший выигрыш в надёжности по сравнению с резервированием замещением;
- 2) изменение электрического режима работы элементов резервируемого узла при отказе хотя бы одного из элементов;
- 3) отказ одного из элементов резервируемого узла может сказаться на безотказной работе оставшихся элементов.

11. Характеристика резервирования замещением [1, подразд. 5.29, с. 201–203].

При резервировании замещением резервные элементы до вступления их в работу могут находиться в одном из трех режимов нагружения:

- в нагруженном режиме, в этом случае говорят о нагруженном резерве или «горячем» резервировании.
- в облегченном режиме, в этом случае говорят об облегченном резерве или «тёплом» резервировании.
- в ненагруженном режиме, в этом случае говорят о ненагруженном резерве или «холодном» резервировании.

12. Анализ безотказности РЭУ при наличии резервирования замещением [1, подразд. 5.30, с. 203–205].

Методы анализа безотказности зависят от того, в каком режиме нагружения находится резерв. Для выполнения анализа необходимо составить

схему (модель) расчёта надёжности в зависимости от структуры изделия с учётом резервирования.

Раздел 5. Обеспечение надёжности устройств на этапе проектирования, производства и эксплуатации

1. Понятие эксплуатационной надёжности РЭУ [1, п. 5.25.1, с. 193].

Надёжность, которую РЭУ показывают в процессе эксплуатации, называют эксплуатационной надёжностью.

2. Общая характеристика методов повышения надёжности РЭУ [1, п. 5.25.2, с. 193–194].

Все методы повышения надёжности РЭУ можно условно разбить на две группы методов: схемотехнические и конструкторско-технологические.

3. Программа обеспечения надёжности.

Программа обеспечения надёжности (ПОН) – технический документ, разрабатываемый по требованию заказчика или по согласованию с ним и включающий комплекс взаимосвязанных организационных и технических мероприятий, позволяющих обеспечить требования к показателям надёжности. ПОН может составляться на изделие в целом, его составные части и даже на отдельные технологические операции. Типовая форма ПОН соответствует табл. 2.1.

Таблица 2.1

Программа обеспечения надёжности

Этапы	Мероприятия ПОН	Срок исполнения	Исполнитель	Вид отчётного документа	Используемые нормативные технические документы
...

4. Расчёт норм надёжности на составные части РЭУ [2, пример 5.2, с. 56].

Норма надёжности – это требование к показателям надёжности конкретной части РЭУ. Процедуру определения требований к показателям надёжности составных частей РЭУ, основываясь на заданном требовании к надёжности РЭУ в целом, называют расчётом норм надёжности.

5. Общая характеристика методов повышения надёжности РЭС на этапе проектирования.

Основными методами, обеспечивающими требования к показателям надёжности на этапе проектирования, являются следующие:

- правильный (удачный) выбор электрических схем;
- удачность конструктивного исполнения РЭУ (удачность компоновки);
- выбор для конструкции высоконадёжных комплектующих элементов, изделий и защита их от воздействия дестабилизирующих факторов;
- правильный выбор элементов с точки зрения их устойчивости и стойкости к действию факторов окружающей среды. Очень важно обеспечить какие-то запасы по температуре, уровню механического воздействия и т.д.;

- правильный выбор электрических режимов работы элементов. Недопустимо использовать элементы с коэффициентом нагрузки $K_n > 1$;
- правильный выбор материалов конструкции. Старение материалов должно быть таким, чтобы их долговечность (ресурс, срок службы) отвечала требованиям надёжности;
- использование для изготовления конструкции проверенных совершенных технологических процессов;
- использование резервирования. Его можно рассматривать как крайнюю меру, ибо резервирование наряду с повышением надёжности ухудшает ряд других показателей качества (габариты, масса, стоимость).

6. Схемотехнические способы повышения надёжности РЭУ.

1. Схема должна иметь минимальное количество элементов. Эффект выигрыша в надёжности в этом случае объясняется с помощью основного расчётного соотношения для безотказности РЭУ:

$$P_{\text{РЭУ}}(t_3) = p_1(t_3) \cdot p_2(t_3) \cdot \dots \cdot p_N(t_3).$$

Так как $p_i(t_3) < 1$, то чем меньше сомножителей в выражении, тем выше уровень безотказности РЭУ. Введение в схему дополнительных элементов всегда должно оправдываться улучшением каких-то свойств РЭУ, например, повышением помехозащищённости, улучшением температурной стабильности.

2. Выходные параметры РЭУ должны быть малокритичными к изменениям параметров элементов. Это повысит уровень параметрической надёжности. Нежелательно использование схемы, требующей подбора параметров элементов.

3. Схема должна устойчиво работать в широком диапазоне изменений питающих напряжений. Надо стремиться использовать схемы, не требующие стабилизированных источников питания, усложняющих РЭУ в целом.

7. Квазирезервирование.

Для сложных РЭУ не всегда требуется выполнение функций в полном объёме. При проектировании таких устройств необходимо предусмотреть возможность настройки (адаптации) устройства на выполнение требуемых функций в нужном объёме. Тогда оставшаяся избыточность может использоваться для резервирования. Такой способ повышения надёжности называют *квазирезервированием*.

8. Выбор электрических режимов работы элементов.

Установлено, что близкими к оптимальным являются значения коэффициентов нагрузки $K_n \approx 0,2 \dots 0,6$. В устройствах недопустимо использовать элементы с коэффициентом электрической нагрузки $K_n > 1$.

9. Начальное ограничение коэффициентов нагрузки элементов [9].

Экспериментально установлено, что зависимость интенсивности отказов элементов λ от коэффициента нагрузки K_n является нелинейной. Значения K_n необходимо выбирать так, чтобы не происходило резкого возрастания интенсивности отказов λ . Это лежит в основе принципа начального

ограничения коэффициентов электрической нагрузки элементов и соответствующих рекомендаций для различных видов элементов.

10. Выбор коэффициентов нагрузки с учётом производственного разброса параметров элементов и питающих напряжений [9].

При проектировании устройств массового и серийного производства необходимо принять во внимание не только значения K_n , найденные с учётом номинальных (средних) нагрузок, но и экстремальный режим работы каждого элемента. Под этим режимом для данного элемента понимают такое неблагоприятное сочетание разброса как параметра этого элемента, так и параметров соседних элементов и питающих напряжений, при которых коэффициент нагрузки рассматриваемого элемента принимает максимальное значение (рис. 2.12).

11. Общая характеристика методов обеспечения надёжности устройств на этапе производства.

Мероприятия, связанные с обеспечением надёжности на этапе

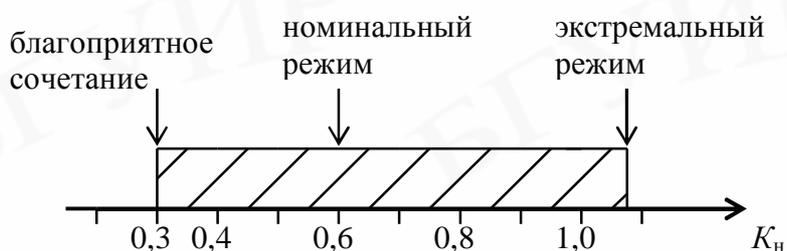


Рис. 2.12. Влияние разброса параметров элементов на коэффициент нагрузки

производства можно свести к следующим основным группам:

- строгое

соблюдение разработанной технологии изготовления РЭУ и совершенствование технологии производства.

Здесь должно внимание

нужно уделить автоматизации производства, позволяющей в значительной степени снизить влияние на надёжность субъективного фактора;

- входной контроль комплектующих элементов и материалов;
- тренировка элементов и РЭУ;
- отбраковка потенциально ненадежных элементов методами неразрушающего контроля;

неразрушающего контроля;

- отбор элементов требуемого уровня надёжности методами индивидуального прогнозирования.

12. Тренировка как способ отбраковки потенциально ненадежных элементов [9].

Тренировка – это такой способ отбраковки ненадежных элементов, при котором элементы заставляют работать в таких условиях и (или) электрических режимах, при которых потенциально ненадежные элементы быстро отказывают, а хорошие элементы при этом не повреждаются и их рабочий ресурс практически не расходуется.

13. Эффективность тренировки [1, подразд. 5.33, с. 208–211, рис. 5.42].

Тренировка эффективна для элементов, интенсивность отказов которых с течением времени уменьшается. Это справедливо для многих типов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Для элементов, время до отказа которых описывается экспоненциальным законом, интенсивность

отказов постоянна. В этих случаях тренировка не ухудшает и не улучшает надёжность, поэтому она нецелесообразна. Для таких элементов, как ЭЛТ, кинескопы, элементы коммутации, механические элементы, время до отказа описывается законом распределения, близким к нормальному. Интенсивность отказов с течением времени возрастает, поэтому для этих элементов тренировка вредна и приводит к выработке рабочего ресурса элементов.

14. Практические приёмы тренировки полупроводниковых приборов [9].

На практике тренировка широко используется для биполярных транзисторов, причем выполняют либо термотренировку, либо электротренировку. Реже выполняют электротренировку.

Типовые схемы подачи обратных напряжений на коллекторный переход в случае электро- и электротермотренировки показаны на рис. 2.13.

15. Технологический прогон РЭУ.

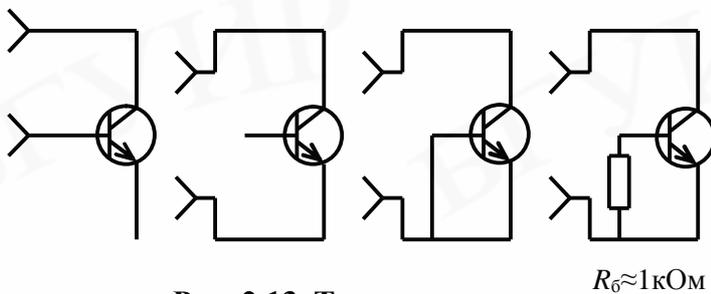
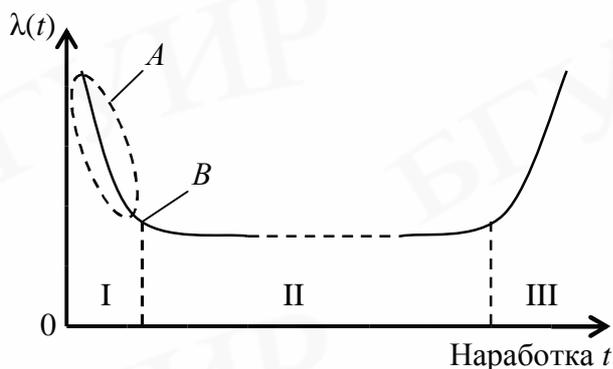


Рис. 2.13. Типовые схемы подачи обратных напряжений

В сложные РЭУ, как правило, входят элементы с различными законами распределения времени до отказа, поэтому для таких РЭУ всегда существует период приработки на λ -характеристике (рис. 2.14). В условиях производства стараются уйти из периода приработки (область А

на рис. 2.14). С этой целью устройства принудительно заставляют работать в течение определенного времени, желательно до момента времени, соответствующего точке В. Устройства, не отказавшие в течение этого времени, поступают к потребителю. Отказавшие экземпляры подвергают ремонту и далее снова ставятся в работу. Указанную процедуру называют



- I – период приработки;
- II – период нормальной эксплуатации;
- III – период старения.

Рис. 2.14. Типичная λ -характеристика РЭУ технологическим прогоном РЭУ.

16. Отбраковка элементов методами индивидуального прогнозирования надёжности [1, подразд. 6.5, с. 218, 219, рис. 6.4, выражение (6.5)].

На практике находят применение методы, основанные на использовании информативных параметров. Эти методы иначе называются методами распознавания образов. Под информативным понимают такой электрический параметр элемента, значение которого в момент времени $t = 0$ несёт информацию о надёжности. Прогноз получают в виде отнесения конкретного экземпляра на интересующий момент времени к классу надёжных или классу ненадёжных экземпляров.

17. Методы индивидуального прогнозирования надёжности, используемые на практике [1, подразд. 6.9, с. 226, 227].

На практике находят применение следующие методы:

- метод статистических решений (в предположении нормального закона распределения информативных параметров в классе надёжных и классе ненадёжных экземпляров);
- метод потенциальных функций;
- метод дискриминантных функций;
- метод пороговой логики.

18. Метод пороговой логики [1, подразд. 6.10, с. 227–231; 10].

В методе пороговой логики непрерывные отсчеты информативных параметров преобразуются в двоичный код (числа «0» и «1») и в дальнейшем оперируют числами 0 и 1. В итоге прогнозирующее правило может быть представлено простой логической таблицей, показывающей, какой комбинации двоичных чисел соответствует тот или иной класс экземпляра.

19. Общая характеристика методов повышения надёжности РЭС на этапе эксплуатации.

Основными методами на этом этапе являются:

1. Строгое соблюдение установленных правил эксплуатации.
2. Строгое соблюдение профилактического осмотра и планового технического обслуживания, предусмотренного документацией.
3. Предсказание постепенных отказов методами прогнозирования экстраполяции параметра и заблаговременная замена устройств, у которых может возникнуть постепенный отказ.

20. Прогнозирование постепенных отказов методами экстраполяции (случай однопараметрических устройств) [1, подразд. 6.3, с. 214–216].

Если РЭУ характеризуется одним выходным параметром, то трудностей с прогнозированием постепенных отказов для этих РЭУ не существует, так как для них можно использовать обратное прогнозирование методом экстраполяции параметра (рис. 2.15).

При таком прогнозировании определяют время $t_{от}$, при котором функциональный параметр $y^{(j)}$ j -го экземпляра достигнет нижнего y_n^* или верхнего y_b^* отказного уровня. Замену экземпляра (РЭУ) нужно производить не

в момент $t_{от}$, а немного раньше. Для этого следует для времени $t_{от}$ найти нижнюю доверительную границу.

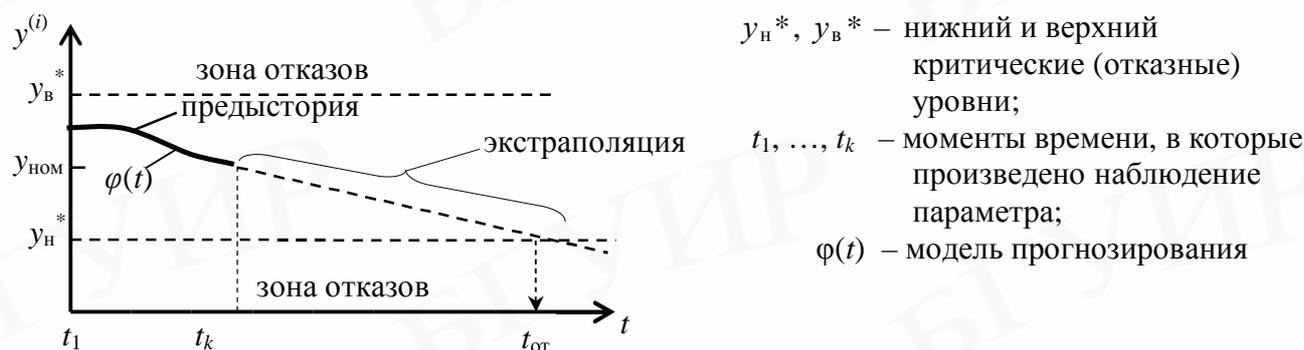


Рис. 2.15. Прогнозирование методом экстраполяции параметра

21. Прогнозирование работоспособности многопараметрических РЭУ.

С точки зрения потери работоспособности для таких устройств можно выделить два случая:

1. Потеря работоспособности (отказ) РЭУ возникает при достижении нижнего или верхнего отказного уровня хотя бы одним функциональным параметром (наиболее характерный случай).

2. Потеря работоспособности (отказ) РЭУ происходит в случае достижения отказного уровня всеми функциональными параметрами.

Для первого случая ответ на интересующий вопрос можно получить, реализовав для каждого из функциональных параметров процедуру индивидуального прогнозирования экстраполяцией (решение задачи обратного прогнозирования). В этом случае время отказа РЭУ в целом $t_{от}$ РЭУ определяют как

$$t_{от \text{ РЭУ}} = \min \{t_{от1}, t_{от2}, \dots, t_{от m}\}, \quad (2.32)$$

где m — число функциональных параметров, описывающих РЭУ.

Во втором случае в качестве $t_{от}$ РЭУ принимают время достижения отказного уровня последним из функциональных параметров.

2.3. Вопросы для самопроверки

К разделу 1

1. Укажите основные причины обострения проблемы надёжности изделий радиоэлектроники и приборостроения.
2. Почему надёжность является комплексным свойством технических изделий?
3. В чём состоит принципиальное отличие понятий «безотказность» и «работоспособность» технических изделий?
4. В чём отличие понятий «наработка» и «наработка до отказа»?

5. В чём состоит принципиальное различие между внезапными и постепенными отказами?

6. Чему обязан деградационный отказ своим названием?

7. В чём состоит суть конструктивного отказа?

8. Приведите пример из практики параллельного соединения элементов в устройстве с точки зрения надёжности.

9. Закон распределения какой случайной величины имеют в виду, когда говорят «модель отказа изделия» или, более полно, – «математическая модель отказа изделия»?

10. Какую смысловую нагрузку несёт слово «единичный» в понятии «единичный показатель надёжности»?

11. Какую смысловую нагрузку несёт слово «комплексный» в понятии «комплексный показатель надёжности»?

12. Какой формулой может быть выражена суть экспоненциального закона надёжности? Поясните параметры этой формулы.

13. Чем объясняется наличие периода приработки на λ -характеристике технических изделий?

14. Укажите примерную продолжительность периода приработки на λ -характеристике технических изделий.

15. Почему такой показатель безотказности устройств, как «наработка на отказ T_0 », более полно может быть назван «средней наработкой на отказ»?

16. В каком случае показатель безотказности «средняя наработка до отказа» может быть назван «средним временем безотказной работы»?

17. Какой примерно процент изделий радиоэлектроники (приборостроения) проработает безотказно, если в ТУ (технических условиях) на изделие указано: «среднее время безотказной работы составляет не менее 3500 ч»?

18. Укажите значение знака «?» в записи для устройства: $T_{cp} = T_{\gamma \approx ? \%}$.

19. Как понимать запись в ТУ на устройство: «95-процентная наработка до отказа – не менее 100 ч»?

20. Сколько времени (в часах) проработает без отказов 99 % устройств данного типа, если в ТУ на устройство записано: «наработка на отказ – не менее 3500 ч»?

21. Как соотносятся между собой значения таких показателей безотказности, как «наработка на отказ» и «среднее время безотказной работы», в случае экспоненциального распределения времени до отказа ремонтируемого устройства данного типа?

22. Как понимать запись в ТУ на устройство: «95-процентное время восстановления – не более 3 ч»?

23. С помощью каких временных понятий судят о таком свойстве изделий (элементов или устройств), как долговечность?

24. Укажите возможные критерии предельного состояния устройства приборостроения (радиоэлектроники).

25. Почему такой показатель долговечности, как «установленный срок службы», не имеет физического смысла и, естественно, не используется для элементов?

26. Для каких изделий используют такой показатель долговечности, как «назначенный ресурс»?

27. В чём состоит различие таких комплексных показателей надёжности, как «коэффициент готовности» и «коэффициент оперативной готовности»?

К разделу 2

1. Почему вероятность безотказной работы за время t_3 не была выбрана в качестве справочной характеристики надёжности (безотказности) элементов?

2. Почему в качестве основной справочной характеристики надёжности (безотказности) элементов была выбрана интенсивность отказов λ ?

3. Какова размерность интенсивности отказов λ элементов?

4. Вместо знаков «?» поставьте нужные числа:

$3 \cdot 10^{-7}$ 1/ч = ? % на 1000 ч работы = ? фит.

5. Какому электрическому режиму и каким условиям эксплуатации соответствуют значения интенсивности отказов λ , приводимые в документации на элементы?

6. В какой рубрике (разделе) ТУ на элементы данного типа необходимо искать справочное значение интенсивности отказов λ ?

7. Какую смысловую нагрузку несут слова «при наработке $t_n = 20\,000$ ч» в записи на элементы рассматриваемого типа: «интенсивность отказов, приведённая к нормальным эксплуатационным условиям, – не более $0,5 \cdot 10^{-7}$ 1/ч при наработке $t_n = 20\,000$ ч»?

8. Что на физическом уровне показывает численное значение коэффициента электрической нагрузки элемента, например $K_n = 0,2$?

9. Как определять коэффициент электрической нагрузки резистора?

10. Как определять коэффициент электрической нагрузки конденсатора?

11. Как определять коэффициент электрической нагрузки транзистора?

12. Как определять коэффициент электрической нагрузки интегральной микросхемы?

13. Как определять коэффициент электрической нагрузки элемента коммутации?

14. Почему при прочих равных условиях гибридные ИС менее надёжны в сравнении с полупроводниковыми ИС?

15. Чем объясняется, что надёжность ИС слабо зависит от степени её интеграции?

16. Почему при прочих равных условиях цифровые ИС более надёжны в сравнении с аналоговыми ИС?

17. Какое примерно соотношение между внезапными и постепенными отказами имеет место для полупроводниковых приборов?

18. Чем объясняется, что высокоомные резисторы являются менее надёжными (при прочих равных условиях)?

19. Чем объясняется, что резисторы объёмного сопротивления при прочих равных условиях являются более надёжными в сравнении с плёночными резисторами, например типа МЛТ?

20. Что означает «закон десяти градусов», который справедлив для конденсаторов?

21. Из-за чего подстроечные и регулировочные резисторы имеют меньший уровень надёжности в сравнении с резисторами постоянного сопротивления?

22. Как задаётся интенсивность отказов в ТУ применительно к разёмам?

23. Почему при проектировании устройств возникает задача пересчёта справочных значений интенсивности отказов элементов?

24. Какие факторы принимают во внимание на этапе пересчёта справочных значений интенсивности отказов элементов?

25. Какая модель (выражение) в настоящее время наиболее часто используется для пересчёта справочных значений интенсивности отказов элементов на конкретный электрический режим и условия работы в составе устройств?

26. Как на практике при пересчёте справочного значения интенсивности отказов элемента можно учесть его коэффициент электрической нагрузки в случае, когда номограммы для пересчёта отсутствуют?

27. Как на практике при пересчёте справочного значения интенсивности отказов элемента можно учесть температуру элемента в случае, когда номограммы для пересчёта отсутствуют?

К разделу 3

1. Какие допущения применяют при выводе основных расчётных соотношений, используемых для оценки показателей безотказности и показателей ремонтпригодности устройств, базируясь на справочных данных о показателях безотказности и восстанавливаемости элементов?

2. Запишите основное расчётное соотношение для оценки вероятности безотказной работы устройства, основываясь на показателях безотказности элементов.

3. Запишите основное расчётное соотношение для оценки вероятности безотказной работы устройства в случае справедливости для элементов экспоненциального закона надёжности.

4. Запишите основное расчётное соотношение для определения среднего времени восстановления устройства, основываясь на показателях безотказности и показателях восстанавливаемости элементов.

5. Чем принципиально отличаются между собой существующие методы расчёта показателей надёжности устройств?

6. Что выступает в качестве исходных данных при выполнении ориентировочного расчёта показателей надёжности устройств?

7. На каком этапе проектирования устройства выполняют ориентировочный расчёт показателей его надёжности?

8. Как выполняется учёт электрического режима и условий работы элементов при ориентировочном расчёте показателей надёжности?

9. В чём состоит назначение обобщённого эксплуатационного коэффициента (иначе называемого коэффициентом эксплуатации, эксплуатационным коэффициентом)?

10. Для какого периода эксплуатации (на λ -характеристике) устройства выполняется расчёт его показателей безотказности?

11. Какими допущениями пользуются при выполнении ориентировочного расчёта показателей надёжности устройств?

12. Как при ориентировочном расчёте определяют значение обобщённого эксплуатационного коэффициента, чем руководствуются?

13. Из каких документов берутся справочные значения интенсивностей отказов элементов при выполнении расчёта показателей надёжности устройств?

14. В чём состоит принципиальное отличие уточнённого расчёта показателей надёжности устройств (расчёта с учётом значений K_n элементов и условий их работы в составе устройств) от ориентировочного расчёта?

15. На каком этапе проектирования устройства выполняют уточнённый расчёт показателей его надёжности?

16. Что рассматривается в качестве исходных данных для уточнённого расчёта показателей надёжности устройства?

17. Почему расчётные значения таких показателей безотказности устройства, как наработка на отказ T_0 и среднее время безотказной работы $T_{ср}$, могут не иметь физического смысла?

18. Чем объясняется (на физическом уровне), что цикличность работы устройств может существенно снизить реальный уровень их надёжности?

19. Что такое интенсивность отказов элемента (устройства) за счёт цикличности работы?

20. Каковы размерность и примерные значения интенсивности отказов, обусловленные цикличностью работы типовых элементов радиоэлектроники и приборостроения?

21. В чём состоит смысл такой характеристики, как «частота циклов работы устройства»?

22. При каком значении частоты циклов работы циклический характер работы устройства может существенно сказаться на реальной его надёжности?

23. От чего зависит достоверность расчёта показателей надёжности устройств?

24. Что означает принцип статистической устойчивости показателей безотказности элементов?

25. На чём основан принцип расчёта показателей надёжности устройств в случае разных законов распределения времени до отказа?

26. Что понимают под постепенным отказом устройства?

27. Какие причины способствуют возникновению постепенных отказов устройств?

28. К расчёту какой величины в конечном итоге сводится оценка уровня параметрической надёжности устройства?

К разделу 4

1. В чём отличие постоянного резервирования от резервирования замещением?

2. Какими приёмами может выполняться переключение в случае резервирования замещением?

3. Что является основной количественной характеристикой резервирования?

4. Какое резервирование называют дублированием?

5. В чём отличие отдельного резервирования от общего резервирования?

6. В каких случаях постоянного резервирования принципиально важен характер отказа элементов резервируемого узла: «короткое замыкание» или «обрыв»?

7. Какие способы соединения элементов резервируемого узла могут быть использованы в случае постоянного резервирования?

8. В каких случаях прибегают к последовательному способу соединения элементов резервируемого узла при постоянном резервировании?

9. В каких случаях прибегают к параллельному способу соединения элементов резервируемого узла при постоянном резервировании?

10. В каких случаях прибегают к смешанному способу соединения элементов резервируемого узла при постоянном резервировании?

11. В чём состоит отличие параллельно-последовательной схемы от последовательно-параллельной схемы в случае постоянного резервирования?

12. В чём состоят основные достоинства постоянного резервирования по сравнению с резервированием замещением?

13. В чём состоят основные недостатки постоянного резервирования по сравнению с резервированием замещением?

14. На уровне каких структурных единиц обычно выполняют постоянное резервирование в случаях, когда характер отказа (короткое замыкание или обрыв) элемента резервируемого узла является принципиальным с точки зрения надёжности узла в целом?

15. В каких режимах нагружения могут находиться резервные элементы до их вступления в работу при резервировании замещением?

16. Что такое нагруженный резерв или «горячее резервирование»?

17. Что такое облегчённый резерв или «тёплое резервирование»?

18. Что такое ненагруженный резерв или «холодное резервирование»?

19. В чём состоят основные достоинства резервирования замещением по сравнению с постоянным резервированием?

20. В чём состоят основные недостатки резервирования замещением по сравнению с постоянным резервированием?

21. Почему для устройств цифровой обработки информации (ЭВМ и т.п.) не используют резервирование замещением?

22. На уровне каких структурных единиц обычно выполняют резервирование замещением?

К разделу 5

1. Что понимают под эксплуатационной надёжностью устройств?

2. Что такое программа обеспечения надёжности?

3. В каких случаях разрабатывается программа обеспечения надёжности?

4. Что понимают под нормой надёжности?

5. Перечислите основные схемотехнические методы повышения надёжности устройств.

6. Что такое квазирезервирование?

7. Укажите основные методы повышения надёжности устройств на этапе проектирования.

8. Почему снижение значений коэффициента нагрузки может существенно увеличить безотказность элемента?

9. Почему при определении значения коэффициента нагрузки конкретного элемента необходимо учитывать производственный разброс как параметра этого элемента, так и параметров соседних элементов?

10. Укажите рекомендуемые значения коэффициентов нагрузки элементов.

11. Как следует выбирать материалы конструкций устройств, чтобы обеспечить требования к долговечности (ресурсу, сроку службы)?

12. Что такое тренировка элементов?

13. Для каких элементов в общем случае эффективна тренировка?

14. В чём отличие термотренировки от электротермотренировки?

15. Почему тренировка не является эффективной для элементов коммутации?

16. Чем объясняется то, что автоматизация производства позволяет в значительной степени повысить надёжность устройств?

17. Что понимают под технологическим прогоном устройств?

18. Какая цель преследуется проведением технологического прогона устройств?

19. В чём состоит принципиальное отличие индивидуального прогнозирования от группового?

20. На чём основано индивидуальное прогнозирование распознаванием образов?

21. Почему индивидуальное прогнозирование по информативным параметрам называют «индивидуальным прогнозированием распознаванием образов»?

22. Что понимают под информативным параметром элемента?
23. Что понимают под прогнозирующим правилом?
24. Что такое обучающий эксперимент, в чём состоит его основное назначение?
25. На чём основан метод пороговой логики?
26. В каком виде может быть представлено прогнозирующее правило в методе пороговой логики?
27. Что понимают под математической моделью прогнозирования в случае прогнозирования экстраполяцией параметра?
28. Что понимают под шагом прогнозирования в задачах прогнозирования экстраполяцией?
29. Что такое обратное прогнозирование?
30. Какие подходы используют при прогнозировании работоспособности многопараметрических устройств?

3. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ, ИХ КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЁМ В ЧАСАХ

Перечень лабораторных работ, предлагаемых студентам [3, 4]:

1. Исследование надёжности РЭУ моделированием на ЭВМ отказов элементов (выбор условий моделирования отказов элементов, моделирование отказов, обработка информации об отказах на ЭВМ, получение количественных показателей безотказности РЭУ, физическая интерпретация полученных результатов) – 4 ч.

2. Проверка правильности выбора элементов электронного каскада по коэффициентам электрической нагрузки (моделирование на ЭВМ процесса функционирования электронного каскада, определение значений коэффициентов электрической нагрузки, соответствующих экстремальному режиму работы элементов, принятие решений о правильности использования элементов по коэффициентам их электрической нагрузки) – 4 ч.

3. Отбор транзисторов повышенного уровня надёжности методом индивидуального прогнозирования (моделирование на ЭВМ результатов обучающего эксперимента применительно к биполярным транзисторам, определение пороговых уровней информативных параметров, преобразование информативных параметров в двоичные сигналы, подсчёт весов двоичных сигналов, определение решающей функции для каждого экземпляра обучающей выборки, получение прогнозирующего правила и представление его в виде логической таблицы) – 4 ч.

4. Индивидуальное прогнозирование параметрической надёжности биполярных транзисторов методом имитационных воздействий (моделирование экспериментальных данных, построение зависимостей функционального параметра от имитационного фактора и времени работы, получение функции пересчёта наработки на значение имитационного фактора, прогнозирование

функционального параметра и параметрической надёжности экземпляров контрольной выборки, определение средней ошибки прогнозирования) – 4 ч.

Студентам заочной формы обучения обычно предлагаются первые две лабораторные работы.

4. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

4.1. Содержание контрольной работы

Контрольная работа предусматривает расчёт показателей безотказности и ремонтпригодности РЭУ. Вначале с использованием схмотехнического решения и условий эксплуатации устройства предлагается выполнить ориентировочный расчёт показателей надёжности РЭУ, а затем с учётом выбранных типов и типоразмеров элементов, а также информации о результатах конструкторских расчётов – уточнённый расчёт показателей.

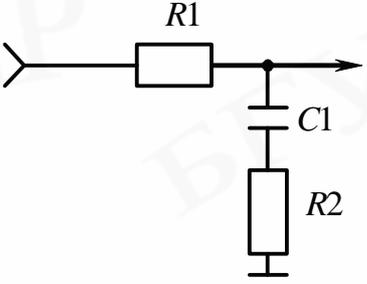
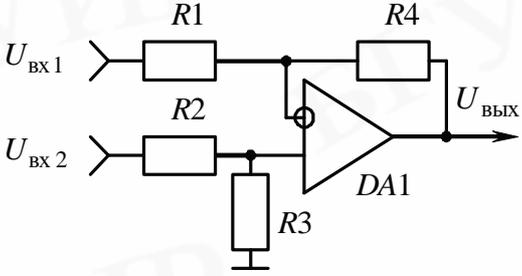
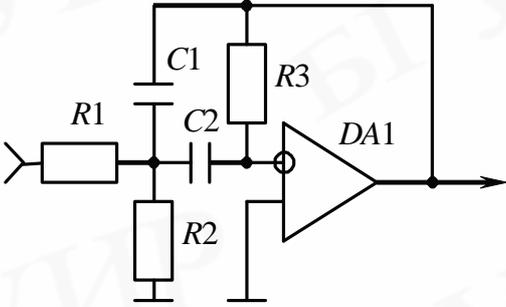
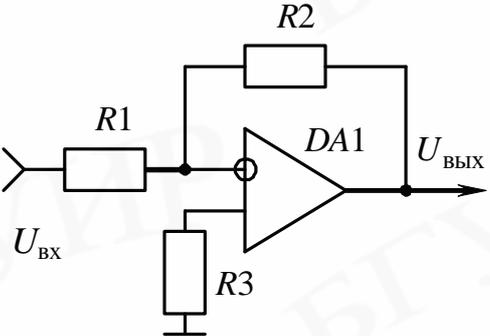
4.2. Исходные данные

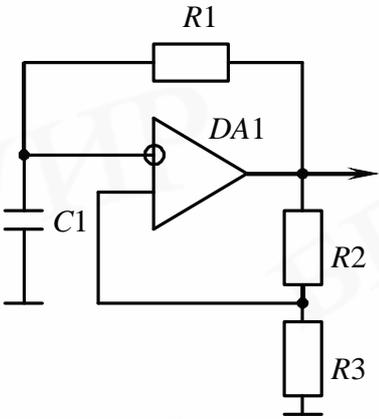
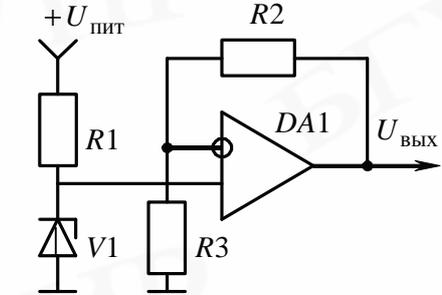
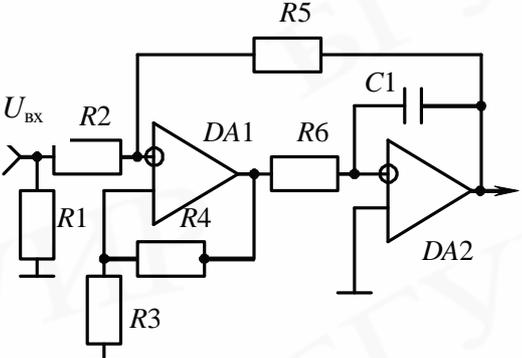
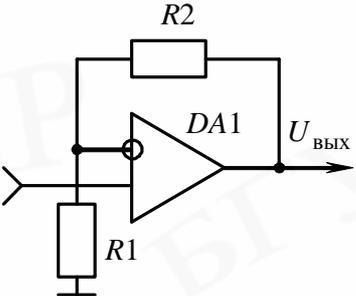
1. Номер варианта электрической принципиальной схемы функционального узла (табл. 4.1).
2. Количество аналогичных функциональных узлов в РЭУ (согласно таблице приложения).
3. Условия эксплуатации по ГОСТ 15150-69 для исполнения, указанного в таблице приложения.
4. Заданное (интересующее) время работы РЭУ $t_3 = 1000$ ч.
5. Требуемое значение вероятности безотказной работы РЭУ за время t_3 (согласно таблице приложения).
6. Заданное время восстановления РЭУ $\tau_3 = 2,5$ ч.
7. Требуемое значение вероятности восстановления РЭУ за время τ_3 не менее 0,95.
8. Перегрев в нагретой зоне (по результатам расчёта теплового режима РЭУ) $\Delta T_3 = 22$ °С.
9. Средний перегрев воздуха внутри РЭУ (по результатам расчёта теплового режима) $\Delta T_в = 18$ °С.

Конкретные исходные данные для пп. 1–3 и 5 берутся студентом из таблицы приложения по двум последним цифрам номера зачётной книжки. Студенты, имеющие номер зачётной книжки, превышающий число 36, берут электрическую схему функционального узла и используют дополнительную информацию к ней согласно варианту 6 табл. 4.1, остальные исходные данные – в соответствии с последней цифрой номера зачётной книжки.

Таблица 4.1

Варианты электрических принципиальных схем

Вариант	Схема	Дополнительная информация
1	<p>Пропорционально-интегрирующий фильтр</p> 	<p>Напряжение входных импульсов $U_{\text{вх. имп}} = 0 \dots 100 \text{ В}$;</p> <p>скважность $Q = 4$</p>
2	<p>Дифференциальный усилитель</p> 	<p>Выходное напряжение</p> $U_{\text{вых}} = \frac{1}{1 + \frac{R2}{R3}} \left(1 + \frac{R4}{R1} \right) U_{\text{вх}2} - \frac{R4}{R1} U_{\text{вх}1} ;$ <p>$U_{\text{вх}1}, U_{\text{вх}2} = 0 \dots 0,1 \text{ В}$</p>
3	<p>Полосовой фильтр</p> 	<p>Резонансная частота</p> $f_0 = \frac{1}{2p} \sqrt{\frac{R1 + R2}{R1R2R3C1C2}} ;$ <p>$U_{\text{вх}} = 0,1 \dots 0,2 \text{ В}$</p>
4	<p>Инвертирующий усилитель</p> 	<p>Коэффициент передачи</p> $K = - \frac{R2}{R1} \frac{1}{1 + \frac{R2}{R1} + \frac{R2}{R_{\text{вх}}} + \frac{R3}{R_{\text{вх}}} \left(1 + \frac{R2}{R1} \right)} ;$ <p>$K_{\text{ОУ}}$ и $R_{\text{вх}}$ – коэффициент усиления и входное сопротивление DA1;</p> <p>$U_{\text{вх}} = 0,1 \dots 0,5 \text{ В}$</p>

Вариант	Схема	Дополнительная информация
5	<p style="text-align: center;">Генератор</p> 	<p style="text-align: center;">Частота</p> $f = \frac{0,23}{C1R1 \ln\left(1 + \frac{2R3}{R2}\right)}$
6	<p style="text-align: center;">Источник опорного напряжения</p> 	<p style="text-align: center;">Выходное напряжение</p> $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{СТ V1}} \left(\frac{R2}{R3} + 1 \right);$ <p style="text-align: center;">$U_{\text{СТ V1}}$ – напряжение стабилизации элемента V1</p>
7	<p style="text-align: center;">Фильтр</p> 	<p style="text-align: center;">Добротность</p> $Q = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{R5(R2 + R1)}{R1R2} \right);$ <p style="text-align: center;">$U_{\text{ВХ}} = 0,1 \dots 0,2 \text{ В}$</p>
8	<p style="text-align: center;">Неинвертирующий усилитель</p> 	<p style="text-align: center;">Коэффициент передачи</p> $K = \frac{R1 + R2}{R1};$ <p style="text-align: center;">$U_{\text{ВХ}} = 0,1 \dots 0,5 \text{ В}$</p>

Вариант	Схема	Дополнительная информация
9	<p>Сумматор-вычитатель</p>	<p>Выходное напряжение</p> $U_{\text{вых}} = \frac{R5}{R1}U1 + \frac{R5}{R2}U2 + \frac{R5}{R3}U3 - \frac{R5}{R4}U4;$ <p>$U1, \dots, U4 = 0,1 \dots 0,5 \text{ В}$</p>

Типы активных элементов, значения параметров резисторов и конденсаторов указаны в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Информация об элементах электрических схем

Вариант	Первичный параметр (элемент схемы)								
	R1, кОм	R2, кОм	R3, кОм	R4, кОм	R5, кОм	C1, мкФ	U _{пит.} , В	Тип V1	Тип DA1, DA2
1	7,5 ±10%	7,5 ±5%	3,0 ±10%	20 ±2%	4,7 ±5%	0,68 ±10%	15 ±10%	КС 133А	К140 УД7
2	8,2 ±5%	6,8 ±10%	2,7 ±5%	18 ±10%	4,7 ±20%	0,68 ±20%	15 ±5%	КС 168А	К140 УД11
3	8,2 ±20%	5,6 ±5%	1,8 ±20%	20 ±10%	3,6 ±5%	0,47 ±10%	15 ±10%	КС 156А	К140 УД8
4	6,8 ±20%	68 ±20%	3,3 ±10%	24 ±10%	4,3 ±10%	1,0 ±20%	12,6 ±5%	КС 147А	К140 УД9
5	6,8 ±5%	9,1 ±20%	3,0 ±5%	16 ±20%	3,3 ±5%	0,75 ±10%	15 ±10%	КС 168А	К140 УД7
6	6,2 ±5%	6,8 ±20%	3,0 ±5%	16 ±10%	4,7 ±10%	0,68 ±20%	12,6 ±5%	КС 147А	К140 УД9
7	6,8 ±10%	4,7 ±20%	1,5 ±20%	24 ±10%	4,7 ±10%	1,5 ±20%	12,6 ±10%	КС 147А	К140 УД9
8	7,5 ±5%	75 ±10%	1,5 ±5%	18 ±10%	4,3 ±10%	0,68 ±20%	15 ±5%	КС 156А	К140 УД11
9	8,2 ±5%	7,5 ±5%	3,3 ±10%	20 ±20%	3,6 ±5%	0,47 ±10%	15 ±10%	КС 156А	К140 УД8

Примечания: 1. Сопротивление резистора R6 принять равным 3 кОм ± 10 %, ёмкость конденсатора C2 – равной 0,47 мкФ ± 10 %.

2. Допускается использовать интегральные микросхемы серий 140 и КР140.

4.3. Задание на расчётную часть работы

1. Выполнить ориентировочный расчёт показателей безотказности РЭУ согласно варианту задания.

Расчёту подлежат следующие показатели безотказности: а) наработка на отказ T_0 ; б) 99-процентная наработка до отказа $T_{\gamma=99}$ %; в) вероятность безотказной работы за заданное время t_3 .

2. Выполнить уточнённый расчёт показателей безотказности. При учёте условий работы принять во внимание следующие факторы:

- а) электрический режим элементов (коэффициенты нагрузки);
- б) температуру (максимальную);
- в) относительную влажность.

Если найденное значение показателя безотказности не отвечает требованиям, указанным в исходных данных, то необходимо принять меры по обеспечению надёжности.

3. Рассчитать следующие показатели ремонтпригодности: а) среднее время восстановления T_B ; б) гамма-процентное время восстановления при $\gamma = 99$ %; в) вероятность восстановления за время τ_3 .

4. Если полученное значение показателя восстанавливаемости не отвечает требованиям, указанным в исходных данных, то следует предложить мероприятия по повышению ремонтпригодности.

4.4. Методические указания по выполнению работы

1. Перед выполнением ориентировочного расчёта показателей безотказности РЭУ следует разобраться с примером расчёта [2, пример 5.3, с. 56–58].

2. Для выполнения уточнённого расчёта показателей безотказности РЭУ рекомендуется рассмотреть пример расчёта [2, пример 5.4, с. 58–62]. Последовательность выполнения уточнённого расчёта показателей надёжности:

2.1. Определить коэффициенты нагрузки элементов, для чего:

- выполнить экспресс-анализ электрической схемы функционального узла и оценить примерный уровень электрической нагрузки на элементах;
- выбрать типы пассивных элементов и с учётом результатов, полученных в предыдущем пункте, выбрать их типоразмеры. Типоразмеры определяются номинальным или предельно допустимым значением основной эксплуатационной электрической характеристики элемента, например: для резисторов – мощностью рассеивания, для конденсаторов – допустимым напряжением на обкладках и т.д;
- оценить значения коэффициентов электрической нагрузки элементов. При этом необходимо принять во внимание экстремальный режим работы каждого элемента. Допускается погрешность до 20...30 %.

2.2. Определить температуру на корпусах элементов с учётом перегревов ΔT_3 и (или) $\Delta T_в$. При выполнении этой работы рекомендуется руководствоваться примером расчёта [2, пример 5.4, п. 2, с. 60, 61].

2.3. Оценить показатели безотказности РЭУ аналогично примеру [2, пример 5.4, пп. 3–7, с. 61]. При определении для справочных значений интенсивностей отказов поправочных коэффициентов, учитывающих коэффициенты нагрузки и температуру, можно воспользоваться номограммами либо формулами (2.18)–(2.20), если имеются сомнения в правомерности использования номограмм. Для учёта влияния относительной влажности рекомендуется воспользоваться литературой [1, прил. 3, табл. ПЗ.2, с. 311].

2.4. При необходимости принять меры по обеспечению показателя безотказности, указанного в исходных данных.

3. Выполнить расчёт показателей ремонтпригодности аналогично примеру расчёта [2, пример 5.4, пп. 8, 9, с. 61, 62].

4. При необходимости принять меры по повышению ремонтпригодности РЭУ.

4.5. Рекомендации по выполнению экспресс-анализа электрической схемы функционального узла

В табл. 4.3–4.11 приводятся выражения, которыми можно пользоваться для выполнения экспресс-анализа электрических схем в соответствии с вариантами табл. 4.1. В формулах приняты такие обозначения: U – напряжение, I – ток, P – мощность. Используемые в этих обозначениях индексы выбраны так, чтобы было понятно, к каким элементам или цепям относятся величины. Некоторые приведённые выражения носят приближённый характер, но они пригодны для инженерной оценки коэффициентов нагрузки. Для детального расчёта электрических схем рекомендуется обратиться к работе [18].

Таблица 4.3

Вариант 1. Пропорционально-интегрирующий фильтр

$ Z = \sqrt{(R1 + R2)^2 + \left(\frac{1}{f_c C1}\right)^2}$		$ I = \frac{U_{вх}}{ Z }$
$U_{R1} = I \cdot R1$	$U_{R2} = I \cdot R2$	$P_{C1} = I ^2 \cdot \frac{1}{f_c C}$

Таблица 4.4

Вариант 2. Дифференциальный усилитель

$U_{R3} = \frac{U_{\text{вх2}} \cdot R3}{R2 + R3}$	$U_{R4} = \frac{U_{\text{вых}} - U_{\text{вх1}}}{R4}$	$I_{R1} = \frac{U_{\text{вх1}}}{R1}$
$I_{R2} = \frac{U_{\text{вх2}}}{R2}$	$I_{R3} = \frac{U_{R3}}{R3}$	$I_{R4} = \frac{U_{R4}}{R4}$
Коэффициент нагрузки микросхемы по току		
$K_n^{(I)} = \frac{I_{\text{вых.раб}}}{I_{\text{вых.макс}}}, \quad \text{где } I_{\text{вых.раб}} = I_{R4}$		

Таблица 4.5

Вариант 3. Полосовой фильтр

$I_{R1,R2} = \frac{U_{\text{вх}}}{R1 + R2}$	$U_{R2} = I_{R1,R2} \cdot R2$	$U_{R1} = U_{\text{вх}} - U_{R2}$
$U_{\text{вых}} = -U_{R2} \cdot f_0 \cdot C2 \cdot R3$	$U_{\text{вых}} = -U_{R2} \cdot f_0 \cdot C2 \cdot R3$	$I_{R3} = \frac{U_{\text{вых}} - U_{R2}}{R3}$
$U_{C2} = U_{R2}$	$U_{C1} = U_{\text{вых}} - U_{R2}$	$I_{C1} = U_{C1} \cdot f_0 \cdot C1$
$I_{C2} = U_{C2} \cdot f_0 \cdot C2$	$K_n^{(I)} = \frac{I_{\text{вых.раб}}}{I_{\text{вых.макс}}}$	$I_{\text{вых.раб}} = I_{R3}$ f_0 – резонансная частота фильтра

Таблица 4.6

Вариант 4. Инвертирующий усилитель

$P_{\text{раб1}} = \frac{U_{\text{вх}}^2}{R_1}$	$P_{\text{раб2}} = \frac{U_{\text{вых}}^2}{R_2}$	$U_{\text{вых}} = -U_{\text{вх}} \cdot \frac{R_2}{R_1}$
$P_{\text{раб3}} = \frac{E_{\text{см}}^2}{R_3}$	$K_n = \frac{P_{\text{раб}}}{P_{\text{ном}}}$	$K_n^{(I)} = \frac{I_{\text{к раб}}}{I_{\text{к ном}}}$
$I_{\text{к раб}} = \frac{ U_{\text{вых}} }{R_n}$		

Таблица 4.7

Вариант 5. Генератор

$K_n^{(R)} = \frac{P_{\text{раб}}}{P_{\text{ном}}}$	$K_n^{(C)} = \frac{U_{\text{раб}}}{U_{\text{ном}}}$	$K_n^{(I, DA1)} = \frac{I_{\text{вых.раб}}}{I_{\text{вых.макс}}}$
$K_n^{(P, DA1)} = \frac{P_{\text{раб}}}{P_{\text{макс}}}$	$P_{\text{раб}} = I \cdot R$	$I_{R3} = I_{R2} = \frac{U_{\text{вых}}}{R2 + R3}$
$U_{R3} = \frac{U_{\text{вых}}}{R2 + R3} R3$	$U_{R2} = \frac{U_{\text{вых}}}{R2 + R3} R2$	$I_{R1} = \frac{U_{\text{вых}} - U_{R3}}{R1}$
$U_{C1} = U_{R1}$	$I_{\text{вых.раб}} = I_{R1}$	При расчётах принять $U_{\text{вых}} = 10 \text{ В}$

Таблица 4.8

Вариант 6. Источник опорного напряжения

$I_{R1} = I_{ct\ v1}$	$U_{R1} = U_{п}^+ - V_{ct\ v1}$	$U_{R2} = U_{вых} - U_{ct\ v1}$
$U_{R3} = U_{ct\ v1}$	$K_n^{(I)} = \frac{I_{вых.раб}}{I_{вых.макс}}$	$I_{вых.раб} = I_{R2}$

Таблица 4.9

Вариант 7. Фильтр

$I_{R1} = \frac{U_{вх}}{R1}$	$U_{вых\ DA2} = -\frac{R5}{R2} \cdot U_{вх}$	$I_{R2,R5} = \frac{U_{вых\ DA2}}{R5 + R2}$
$I_{R2,R5} = \frac{U_{вых\ DA2}}{R5 + R2}$	$U_{R3} = U_{вх} - I_{R2,R5} \cdot R2$	$U_{вых\ DA1} = U_{R3} \cdot \frac{(R3 + R4)}{R3}$
$U_{R4} = U_{вых\ DA1} - U_{R3}$	$U_{R6} = U_{вых\ DA1}$	$K_n^{(I)} = \frac{I_{вых.раб}}{I_{вых.макс}}$ $I_{вых.раб} = I_{R2,R5}$

Таблица 4.10

Вариант 8. Неинвертирующий усилитель

$U_{oc} = \beta U_{вых} = \frac{R1}{R1 + R2} U_{вых}$, где U_{oc} – напряжение отрицательной обратной связи		
$U_{вых} = U_{вх} \left(1 + \frac{R2}{R1} \right)$	Коэффициент передачи $K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \left(1 + \frac{R2}{R1} \right) = \frac{1}{\beta}$	Входное сопротивление $R_{вх} = R_{вх.д} (1 + \beta K_0)$
Выходное сопротивление $R_{вых}^* = \frac{R_{вых}}{1 + \beta K_0}$	K_n для микросхемы: $K_n^{(I)} = \frac{I_{вых.раб}}{I_{вых.макс}}$	$I_{вых.раб} = I_{R2}$
$I_{R1,R2} = \frac{U_{вх}}{R1 + R2}$	$U_{R1} = \frac{U_{вх}}{R1 + R2} R1$	$U_{R2} = \frac{U_{вх}}{R1 + R2} R2$

Таблица 4.11

Вариант 9. Сумматор-вычитатель

$U_{\text{вх}}^+ = U_{R6} = \frac{U_4 \cdot R_6}{R_4 + R_6},$ <p>где $U_{\text{вх}}^+$ – напряжение на неинвертирующем входе усилителя</p>	$I_{R1} = \frac{U_1 - U_{\text{вх}}^-}{R1},$ <p>где $U_{\text{вх}}^-$ – напряжение на инвертирующем входе усилителя</p>	$U_{\text{вх}}^+ = U_{\text{вх}}^-$
$I_{R4,R6} = \frac{U_4}{R_4 + R_6}$	$I_{R2} = \frac{U_2 - U_{\text{вх}}^-}{R2}$	$I_{R3} = \frac{U_3 - U_{\text{вх}}^-}{R3}$
$I_{R5} = \frac{U_{\text{вых}} - U_{\text{вх}}^-}{R5}$	<p>Коэффициент нагрузки по току для микросхемы</p> $K_n^{(I)} = \frac{I_{\text{вых.раб}}}{I_{\text{вых.макс}}}$	$I_{\text{вых.раб}} = I_{R5}$

4.6. Оформление выполненной работы

Контрольную работу рекомендуется оформлять на листах формата А4 с использованием текстовых редакторов и принтера. Задание, выполненное в контрольной работе, должно быть написано технически правильным языком. Аргументация должна быть краткой, но достаточной для понимания принимаемых решений.

Исходные данные и результаты расчётов необходимо свести в таблицы так, чтобы была обеспечена наглядность результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности : учеб. для студ. инж.-техн. спец. вузов / С. М. Боровиков. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.
2. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности. Сборник задач : учеб. пособие для вузов / С. М. Боровиков, А. В. Погребняков. – Минск : БГУИР, 2001. – 124 с.
3. Лабораторный практикум по курсу «Инженерное обеспечение надёжности РЭС» для студ. спец. «Проектирование и производство РЭС» / С. М. Боровиков [и др.]; под ред. С. М. Боровикова. – Минск : БГУИР, 2002. – 48 с.
4. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности : лабор. практикум для студ. спец. «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС» и «Проектирование и производство РЭС» / С. М. Боровиков, Н. В. Альферович, Т. В. Малышева; под общ. ред. С. М. Боровикова. – Минск : БГУИР, 2005. – 72 с.
5. Надёжность в технике. Основные понятия, термины и определения. ГОСТ 27.002-89. – М. : Изд-во стандартов, 1990.
6. Надёжность и эффективность в технике: справочник. В 10 т. Методология. Организация. Терминология / Под ред. А. И. Рембезы. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
7. European Organization of the Quality Control Glassary. – Bern : EOQC, 1988. – 24 p.
8. Никулин, С. М. Надёжность элементов радиоэлектронной аппаратуры / С. М. Никулин. – М. : Энергия, 1979. – 80 с.
9. Улинич, Р. Б. Практическое обеспечение надёжности при проектировании / Р. Б. Улинич. – М. : Радио и связь, 1985. – 112 с.
10. Боровиков, С. М. Метод прогнозирования надёжности изделий электронной техники / С. М. Боровиков [и др.] // Доклады НАН Беларуси. – 2006. – Т. 50. – №4. – С. 105–109.
11. Боровиков, С. М. Выбор имитационных факторов при прогнозировании отказов биполярных транзисторов / С. М. Боровиков, А. В. Емельянов, А. И. Бересневич // Известия НАН РБ. Сер. физ.-техн. наук. – 2006. – №3. – С. 109–112.
12. Боровиков, С. М. Прогнозирование надёжности полупроводниковых приборов методом имитационного моделирования / С. М. Боровиков, А. И. Щерба // Доклады БГУИР : электроника, материалы, технологии, информатика. – 2003. – Т. 1. – №2. – С. 113–117.
13. Литвинский, И. Е. Обеспечение безотказности МЭА на этапе производства / И. Е. Литвинский, В. А. Прохоренко, А. Н. Смирнов. – Минск : Беларусь, 1989. – 191 с.

14. Шишонок, Н. А. Основы теории надёжности и эксплуатации радиоэлектронной техники / Н. А. Шишонок, В. Ф. Репкин, Л. Л. Барвинский; под ред. Н. А. Шишонка. – М. : Сов. радио, 1964. – 552 с.

15. Гаскаров, Д. В. Прогнозирование технического состояния и надёжности радиоэлектронной аппаратуры / Д. В. Гаскаров, Т. А. Голинкевич, А. В. Мозгалевский; под ред. Т. А. Голинкевича. – М. : Сов. радио, 1974. – 224 с.

16. Чернышев, А. А. Основы надёжности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А. А. Чернышев. – М. : Радио и связь, 1989. – 256 с.

17. Неразрушающий контроль элементов и узлов РЭА / под ред. Б. Е. Бердичевского. – М. : Сов. радио, 1976. – 296 с.

18. Свирид, В. Л. Микросхемотехника аналоговых электронных устройств / В. Л. Свирид. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 256 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Варианты исходных данных для контрольной работы

Последние две цифры номера зачётной книжки	Вариант электрической схемы функционального узла по табл. 4.1	Количество однотипных функциональных узлов в составе РЭУ	Исполнение РЭУ по ГОСТ 15150-69	Требуемая вероятность безотказной работы РЭУ за время t_3
01	2	35	УХЛ 2	0,95
02	3	30	УХЛ 3	0,95
03	4	35	УХЛ 3.1	0,95
04	5	35	УХЛ 4	0,95
05	6	30	УХЛ 4.1	0,95
06	7	30	УХЛ 4.2	0,95
07	8	45	УХЛ 5	0,95
08	9	40	УХЛ 5.1	0,95
09	2	40	У 1	0,90
10	3	40	У 1.1	0,90
11	4	35	У 2	0,90
12	5	35	У 2.1	0,90
13	6	30	У 3.1	0,90
14	7	35	У 5	0,90
15	8	45	У 5.1	0,90
16	9	45	ХЛ 1	0,90
17	2	45	ХЛ 1.1	0,92
18	3	50	ХЛ 2	0,92
19	4	40	ХЛ 2.1	0,92
20	5	40	ХЛ 3	0,92
21	6	35	ХЛ 3.1	0,92
22	7	40	ХЛ 5	0,92
23	8	50	ХЛ 5.1	0,92
24	9	50	УХЛ 1	0,92
25	2	38	УХЛ 1.1	0,96
26	3	48	УХЛ 2	0,96
27	4	33	УХЛ 2.1	0,96
28	5	33	УХЛ 3	0,96
29	6	38	УХЛ 3.1	0,96
30	7	33	УХЛ 4	0,96
31	8	33	УХЛ 4.1	0,96
32	9	35	УХЛ 4.2	0,96
33	2	40	УХЛ 2	0,95
34	3	35	УХЛ 2.1	0,95
35	4	40	УХЛ 3	0,95
36	5	35	УХЛ 3.1	0,95

Учебное издание

Боровиков Сергей Максимович

НАДЁЖНОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Методическое пособие
для студентов специальности
«Техническое обеспечение безопасности»

Редактор С. Б. Саченко
Корректор Н. В. Гриневич

Подписано в печать
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 2,5.

Формат 60x84 1/16.
Печать ризографическая.
Тираж 150 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л.
Заказ 150.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6