

ПРИДНЕСТРОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Т.Г.ШЕВЧЕНКО

Физико-технический институт
Инженерно-технический факультет

Кафедра автоматизированных технологий и промышленных комплексов

ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Учебно-методическое пособие

Тирасполь

*Издательство
Приднестровского
университета*

2024

УДК 681.5.001:378.147.88 (072.32)

ББК з965-021p20+ч448.027.64p20

Д44

Составители:

А. В. Деткова, канд. пед. наук, доц.

Д. А. Котиц, ст. преп.

Рецензенты:

О. В. Раснюк, главный инженер ЗАО «Тирстрой механизация им. Н. П. Голуб»

В. Г. Звонкий, зав. кафедрой автоматизированных технологий и промышленных комплексов ИТФ ФТИ, доц.

Д44

Диагностика и надежность автоматизированных систем и интеллектуальных систем управления: учебно-методическое пособие / составители: А. В. Деткова, Д. А. Котиц. – Тирасполь: Изд-во Приднестр. ун-та, 2024. – 130 с. – Текст. Изображения : электронные.

Системные требования : CPU (Intel/AMD) 1,5 ГГц / ОЗУ 2 Гб / HDD 450 Мб / 1024*768 / Windows 7 и старше / Internet Explorer 11 / Adobe Acrobat Reader 6 и старше.

Учебно-методическое пособие содержит цикл рационально составленных практических заданий и лабораторных работ по дисциплине «Диагностика и надежность автоматизированных систем и интеллектуальных систем управления». Практические занятия посвящены изучению общих вопросов диагностики и надежности автоматизированных систем, а в лабораторных работах представлена методика проведения расчета надежности радиоэлектронного устройства на основе экспоненциального закона распределения отказов АСУ. Пособие в своем составе имеет большое количество справочных материалов, необходимых для выполнения подобного рода расчетов.

Предлагаемое учебно-методическое пособие для бакалавриата направления подготовки 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств подготовлены в соответствии с учебными планами и рекомендованы студентам данного направления подготовки.

УДК 681.5.001:378.147.88 (072.32)

ББК з965-021p20+ч448.027.64p20

Рекомендовано Научно-методическим советом ПГУ им. Т.Г. Шевченко

© Деткова А. В., Котиц Д. А., составление, 2023

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Диагностика и надежность автоматизированных систем и интеллектуальных систем управления» относится к вариативной части блока 1 (Б1) учебного плана направления 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств профиль «Автоматизация технологических процессов и производств» (по отраслям) в соответствии с ФГОС ВО.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 8 зачетные единицы, 288 часов. Данная дисциплина необходима и обязательна для успешного освоения последующих профильных дисциплин.

Цели освоения дисциплины:

- изучение методов обеспечения надежности и безопасности автоматизированных систем, их диагностики, как средства повышения надежности систем.

Задачами освоения дисциплины является изучение:

- основных положений теории надёжности;
- видов отказов, основных показателей надёжности систем управления;
- методов расчета надежности программного и аппаратного обеспечения систем управления;
- методов повышения надежности систем управления (ИС);
- влияния человека-оператора на функционирование систем управления, методики проведения испытаний систем управления на надежность.

В результате обучения должны быть сформированы следующие профессиональные компетенции:

ПК-14 Способность участвовать в разработке мероприятий по проектированию процессов разработки и изготовления продукции, средств и систем автоматизации, контроля, диагностики,

испытаний, управления производством, жизненным циклом продукции и ее качеством, их внедрения.

ПК-19 Способность участвовать в работах по моделированию продукции, технологических процессов, производств, средств и систем автоматизации, контроля, диагностики, испытаний и управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством с использованием современных средств автоматизированного проектирования, по разработке алгоритмического и программного обеспечения средств и систем автоматизации и управления процессами

Надёжность является одной из главнейших проблем конструирования, и понимают под ней 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.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения изделия и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость, а также определенные сочетания этих свойств. Для описания различных сторон этого свойства на практике пользуются показателями надежности, представляющими собой количественные характеристики одного или нескольких свойств, определяющих надежность изделия.

В ходе изучения дисциплины должен быть произведен расчёт:

- вероятности выхода из строя устройства, которое может быть вызвано выходом из строя любого из элементов схемы;
- время, через которое устройство должно выйти из строя, ввиду износа элементов;
- процентная вероятность того, что устройство проработает безотказно в течении заданного промежутка времени;
- время, в течении которого устройство будет работать безотказно с вероятностью 95%.

Выполнение данного расчета должно опираться на знания, полученные при изучении математики, физики, теории вероятностей и математической статистики. Также студенты должны использовать умение чтения принципиальных электрических схем, нахождения коэффициентов электрической нагрузки, использования справочной литературы и применения информационных технологий и систем автоматизированного проектирования.

В основу данного пособия вошли материалы учебно-методического пособия «Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств» С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Ф. Д. Троян; Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники», 2010 [1].

Разработанное учебно-методическое пособие поможет обучающимся успешно освоить дисциплину и изучить алгоритм проведения расчета показателей надежности автоматизированных систем.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ

АС	– автоматизированные системы
БИС	– большая интегральная схема
ИМС	– интегральная микросхема
ИС	– интегральная схема
КМОП	– структура на комплементарных МОП-транзисторах
МОП	– структура «металл – окисел – полупроводник»
НИР	– научно-исследовательская работа
ОЗУ	– оперативное запоминающее устройство
ОКР	– опытно-конструкторская работа
ПЗУ	– постоянное запоминающее устройство
ПЛИС	– программируемые логические интегральные схемы
ППЗУ	– программируемое ПЗУ
ППП	– полупроводниковый прибор
РПЗУ	– перепрограммируемое (репрограммируемое) ПЗУ
РЭА	– радиоэлектронная аппаратура
РЭС	– радиоэлектронное средство
РЭУ	– радиоэлектронное устройство
РЭФУ	– радиоэлектронный функциональный узел
СБИС	– сверхбольшая интегральная схема
СВЧ	– сверхвысокая частота
ТЗ	– техническое задание
ТТ	– технические требования
ТУ	– технические условия
ЭРИ	– электрорадиоизделие
Chip Carrier	– корпус с расположенными на его нижней части контактами, предназначенный для поверхностного монтажа

CMOS – Complement Metal Oxide Semiconductor (комплементарная структура метал – окисел – полупроводник, русскоязычная аббревиатура – КМОП)

DIP – Dual In-line Package (корпус с двумя рядами прямоугольных выводов – ДИП-корпус, представляет собой прямоугольный корпус с расположенными на длинных сторонах контактами. Его также называют корпусом второго типа. В зависимости от материала корпуса выделяют два варианта исполнения: *PDIP* – Plastic DIP, имеет пластиковый корпус; *CDIP* – Ceramic DIP, имеет керамический корпус) Flat Package – корпус с планарными выводами JFET – Junction Field-Effect Transistor (полевой транзистор с управляющим p - n -переходом, работающий в режиме обогащения)

PGA – Pin Grid Array (тип корпуса, в котором контактные штыри размещены на дне в виде концентрических квадратов)

PLA – Programmable Logic Array (программируемые логические матрицы – ПЛИМ, программируемые логические интегральные схемы – ПЛИС)

MESFET – Metallized Semiconductor Field-Effect Transistor (полевой транзистор структуры ММП, полевой транзистор с барьером Шоттки)

MOSFET – Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor (канальный полевой униполярный МОП-транзистор)

SMD – Surface Mount Device (СМД – элементы поверхностного монтажа)

SMT – Surface Mount Technology (технология поверхностного монтажа)

QML – Qualified Manufactures List (перечень аттестованных производителей)

QPL – Qualified Products List (перечень аттестованной продукции)

ОСНОВЫ НАДЁЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Цель: изучите основные термины и определения, классификацию отказов и их математическое описание.

Под *надёжностью* понимают свойство изделия (продукта) сохранять в течение заданного промежутка времени в установленных нормах значения функциональных параметров при определённых условиях (заданные режимы и условия эксплуатации, технического обслуживания, хранения и транспортирования).

Надёжность в широком смысле означает способность чего-либо (например, устройства, системы, человека) сохранять свои качества, работать стабильно и предсказуемо в течение продолжительного времени. Надёжность также может относиться к надёжности информации, т.е. ее точности и достоверности.

Автоматизированная система управления – это система, включающая в себя использование компьютеров, программного обеспечения и других технических средств, для управления и контроля различными процессами в автоматическом режиме. Такие системы широко используются в промышленности, транспорте, телекоммуникациях и других областях для повышения эффективности, точности и надёжности управления различными производственными и технологическими процессами.

Под автоматизированной системой управления (АСУ) также понимают комплекс технических средств (компьютеров, устройств числового программного управления станками и промышленными

роботами, промышленных контроллеров, устройств управления транспортными средствами и другими технологическими установками), объединенных локальными вычислительными сетями и обеспечивающих сбор, обработку, хранение и передачу управляющей информации.

В теории и на практике для определения надёжности технических изделий широко пользуются понятием *наработка*, под которой понимают продолжительность работы изделия, выраженную в часах, циклах переключения или других единиц в зависимости от вида и функционального назначения изделия.

Отказ – это ситуация, когда устройство, система или процесс перестают работать или функционировать в соответствии с ожиданиями или требованиями. Отказы могут происходить по различным причинам, таким как технические проблемы, конструкционные дефекты, неправильное использование или старение оборудования. Управление отказами играет важную роль в обеспечении надёжности и эффективности систем, и включает в себя планирование, предотвращение, и восстановление после возникновения отказов.

Под *отказом* изделия понимают полную или частичную потерю изделием работоспособности вследствие снижения одного или нескольких функциональных параметров за пределы установленных норм, прописанных в технической документации.

Под *наработкой до отказа* понимают суммарную наработку изделия от момента начала работы (эксплуатации) до возникновения первичного отказа.

Надёжность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения изделия и условий его применения может включать *безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость* или *определенные комбинации этих свойств*.

Безотказность относится к способности устройства работать без каких-либо отказов или сбоев в течение определенного периода времени или при выполнении определенных функций.

Долговечность связана с тем, насколько долго устройство может оставаться в рабочем состоянии и выполнять свои функции, прежде чем потребуется замена или ремонт.

Ремонтопригодность относится к удобству и возможности выполнить ремонт или замену деталей или компонентов устройства, если возникнут проблемы или неисправности, чтобы вернуть его в рабочее состояние.

Сохраняемость обозначает способность сохранять необходимые свойства и характеристики устройства или оборудования в течение определенного времени при определенных условиях эксплуатации или хранения.

Комбинация этих свойств важна для создания надежных и эффективных технических решений, оборудования и систем, которые могут быть использованы в различных областях промышленности.

Однако для АСУ перечисленных свойств для характеристики надежности оказывается недостаточно. В практике создания и эксплуатации таких систем находят применение дополнительные два единичных свойства надежности:

1. Живучесть – свойство системы сохранять работоспособность (полностью или частично) в условиях неблагоприятных воздействий, не предусмотренных нормальными условиями эксплуатации.

2. Достоверность информации, выдаваемой системой. Это относится к сбоям и ошибкам, искажающим информацию.

При введении в техническую документацию тех или других показателей надежности необходимо исключать лишние, ненужные для описания комплексного показателя надежности, а также те, которые нельзя измерить или которые не имеют определенного ясного и понятного физического смысла.

Для описания и оценки надежности необходимо выделить следующие виды надежности:

1. Аппаратная надежность – надежность комплекса технических средств (КТС).

2. Программная надежность – надежность программного обеспечения (ПО) системы.

3. Функциональная надежность – надежность выполнения отдельных функций, возлагаемых на систему, персоналом системы во взаимодействии с КТС и ПО.

4. Структурная надежность персонала системы – свойство персонала непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени в заданных условиях.

Многие понятия и определения теории надёжности базируются на таких понятиях, как работоспособность и безотказность [1, 2, 4].

Фактор – обстоятельство или совокупность обстоятельств, которые каким-либо образом влияют на отдельные или комплексные свойства АС. Специальный раздел «Анализ физики отказов» изучает влияние существенных факторов на надежность объектов. Эти работы составляют основу проектирования, испытаний и эксплуатации атомных электростанций. В процессе проектирования при оценке свойств надежности, заложенных в проект системы, необходимо учитывать влияние поля значимых факторов на значения показателей надежности. При организации испытаний на надежность должны быть воспроизведены все основные факторы, влияющие на надежность системы. При эксплуатации должны предусматриваться меры по снижению влияния неблагоприятных факторов и созданию комфортных условий для работы персонала, комплекса технических средств и программного обеспечения.

Классификация отказов

В настоящее время существуют различные модели классификации отказов. Одна из них представлена в таблице 1 [1].

Внезапный отказ (ранее называемый также мгновенным) – это отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значения одного или нескольких параметров изделия (продукта). Этот отказ приводит к полной потере работоспособности изделия.

Под постепенным (называемым также параметрическим) понимают отказ, возникающий в результате постепенного, обычно непрерывного и монотонного снижения значения одного или нескольких функциональных параметров изделия и выхода их за пределы норм, указанных в технической (конструкторской) документации. С определением других видов отказов можно ознакомиться в разнообразных источниках [1, 2, 4].

Сбой – это кратковременный самоустраняющийся отказ. Характерным признаком сбоя является восстановление работоспособности без ремонтных (для техники) или восстановительных (для персонала и программного обеспечения) мероприятий. Сбой может возникнуть по разным причинам, таким как технические проблемы, ошибки в программировании, неисправности оборудования и т.д.

Причиной выхода из строя технических средств (устройств, изделий) может быть их кратковременный выход из строя или кратковременное вмешательство; для программного обеспечения – сбой в реализации программы; для оператора – ошибка, приводящая к нарушению выполнения заданного алгоритма. В целом возникновение сбоев приводит к снижению производительности системы, а при определенных условиях может привести к таким искажениям в обработке информации, которые вызовут сбой при выполнении автоматизированной системой заданной функции.

Все устойчивые отказы в АС целесообразно подразделить на следующие три класса:

1. Аппаратные – события, при которых какие-либо технические устройства системы утрачивают работоспособность и для их

восстановления требуется проведение ремонтных работ или замена отказавших элементов, блоков, приборов, устройств и др.

2. Программные – события, при которых программное обеспечение утрачивает работоспособность по причине несовершенства программ (несовершенство алгоритма, ошибки в кодировке, не выявленные в процессе отладки и тестирования, и т. д.).

3. Эргономические – события, при которых персонал теряет работоспособность по причине гибели, ранениях людей или их ошибочных действий при взаимодействии с автоматизированными системами, средствами вычислительной техники или программным обеспечением.

Рассмотрим классификацию отказов радиоэлектронных устройств.

Таблица 1.

Классификация отказов РЭУ и их элементов

Классификационный признак	Вид отказа
Характер возникновения отказа	Внезапный Постепенный
Время существования отказа	Постоянный Временный Перебегающий (временные отказы, следующие один за другим)
Характер проявления отказа	Явный Неявный
Зависимость отказов между собой	Зависимый Независимый
Причина возникновения отказа	Конструктивный Производственный Эксплуатационный Деградационный

Примерное распределение числа отказов РЭА: отказы из-за ошибок проектирования – 40...50 %, отказы из-за ошибок производства – 30...40 %, отказы из-за неправильных действий оператора – 20...30 %.

Замечено, что в 75...80 % случаев различные причины отказов дают о себе знать в виде отказа элементов. Это накладывает заметный психологический отпечаток на потребителей относительно истинных причин отказов.

Математическое описание отказов

По своей физической и математической сущности отказы элементов и устройств являются событиями случайными. В силу этого обстоятельства для количественного описания отказов пригодны приёмы теории вероятностей и математической статистики [1, 4].

Анализируя отказы, было установлено, что дискретной случайной величиной, описывающей отказы, является время до возникновения отказа (в общем случае наработка до отказа).

В настоящее время в отечественной и мировой практике в 95...99% случаев используют предположение об экспоненциальном распределении времени до отказа элементов, при котором плотность распределения времени до отказа задаётся выражением:

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

где λ – параметр распределения для рассматриваемого элемента, численно равный его интенсивности отказов.

Характеристика $w(t)$ плотности распределения времени до отказа на практике не находит широкого применения в качестве показателя надёжности изделий, однако она может найти применение для определения показателей безотказности.

Практическое задание:

1. Изучите основные термины и определения, классификацию отказов и их математическое описание.

2. Приведите примеры отказов объектов автоматизации в соответствии с видами отказов, представленных в таблице 1.
3. Ответьте на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы:

1. Введите понятие надежности. Перечислите свойства изделий в аспекте надежности.
2. Дайте определение автоматизированной системы управления.
3. Дайте определение понятию отказ, наработка, безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.
4. Перечислите дополнительные единичные свойства надежности для АСУ. Поясните их значение.
5. Прокомментируйте виды отказов и способы их классификации.
6. Как классифицируют отказы автоматизированных систем?
7. Математическое описание отказов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Цель: изучить основные группы показателей надежности и их символьно-буквенные обозначения

Надежность – это сложное свойство изделия. Для описания различных параметров этого свойства на практике используются показатели надежности, которые представляют собой количественные характеристики одного или нескольких свойств, определяющих надежность изделия в целом.

При исследовании надежности сложных автоматизированных систем возникает задача выявления причин, приводящих к снижению того или иного аспекта надежности.

Без знания этих причин невозможно составить и реализовать программу обеспечения надежности (ПОН) системы на этапах ее проектирования, разработки и эксплуатации.

Такая программа является частью нормативно-технической документации и имеет определенные рекомендации по обеспечению надежности.

Основные рекомендации по обеспечению технической надежности сложной автоматизированной системы следующие:

1. Применить рациональный дизайн системы, включая соответствующее резервирование и встроенное управление, а также хорошо функционирующее программное обеспечение.
2. Использовать комплектующие, материалы и другие технические устройства, отвечающие требованиям надежности.
3. Уплотнить, термостатировать и обеспечить виброустойчивость оборудования.

4. Защитите от электромагнитных помех.
5. Защитить детали и агрегаты от коррозии (покрытием, пропиткой).
6. Создать элементную базу с низкой чувствительностью к температурным воздействиям и помехам.
7. Использовать материалы повышенной прочности, износостойкости и коррозионной стойкости.
8. Защищайте технические элементы от механических перегрузок.

Рекомендации по обеспечению эксплуатационной надежности автоматизированных систем:

1. Создать комплексную защиту рабочих мест и функциональных помещений, а также обеспечить персонал средствами индивидуальной защиты.
2. Разработать полные и понятные инструкции по эксплуатации СТС и программного обеспечения, уделяя особое внимание нештатным ситуациям.
3. Создать необходимые условия для обслуживания и ремонта СТС, мониторинга и восстановления программного обеспечения.
4. Внедрить рациональную автоматизацию процессов эксплуатации, обслуживания и ремонта.
5. Повышать (поддерживать) квалификацию системного персонала путем непрерывного обучения и повышения квалификации.

Обеспечение эксплуатационной надежности автоматизированных систем является важным аспектом их разработки и поддержки. Вот несколько рекомендаций, которые помогут обеспечить надежность автоматизированных систем:

- Тщательное тестирование: Проведите комплексное тестирование системы на всех этапах ее разработки и внедрения, чтобы выявить и устранить потенциальные проблемы.

- Резервное копирование данных: регулярно создавайте бэкапы данных, чтобы избежать потери информации в случае сбоев или аварий.

- Мониторинг и обслуживание: установите системы мониторинга, которые позволят отслеживать работоспособность и производительность системы, а также регулярно проводите ее обслуживание.

- Использование стандартов и нормативов: при проектировании и разработке системы следуйте общепринятым стандартам и нормативам, таким как ISO 9001, чтобы обеспечить высокое качество продукта.

- Обучение персонала: Обеспечьте профессиональную подготовку и обучение персонала, который будет работать с автоматизированной системой, чтобы избежать ошибок операторов.

- Проектирование с учетом отказоустойчивости: при проектировании системы предусмотрите возможность избегания отказов через резервирование оборудования, создание автономных блоков и дублирование критических компонентов.

Соблюдение этих рекомендаций поможет обеспечить надежность и стабильную работу автоматизированных систем.

На практике часто используют показатели, характеризующие отдельные свойства или комплексные свойства изделия (комплексные показатели).

Показатели надежности подразделяются в соответствии с составляющими надежности на показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохранности. По признаку восстанавливаемости продукции их можно разделить на показатели восстанавливаемой и неремонтпригодной продукции.

Применяются относительные показатели, характеризующие общий уровень надежности, и абсолютные или числовые показатели, характеризующие отдельные типоразмеры машин.

Надёжность изделий в зависимости от их вида может оцениваться частью или всеми показателями надёжности.

На практике используют пять групп показателей:

- показатели безотказности;
- показатели ремонтпригодности;
- показатели долговечности; показатели сохраняемости;
- комплексные показатели надёжности.

Все показатели, кроме комплексных, относятся к единичным показателям. Под единичным понимают показатель, характеризующий одно из свойств, составляющих надёжность изделия: либо безотказность, либо ремонтпригодность и т.п.

Комплексный показатель характеризует несколько свойств, составляющих надёжность изделия (два и более свойства).

Основные единые показатели надёжности, используемые в инженерной практике, показаны на рисунке 1. Они записываются с помощью их обозначений, пояснение которых приведено в таблице 2.

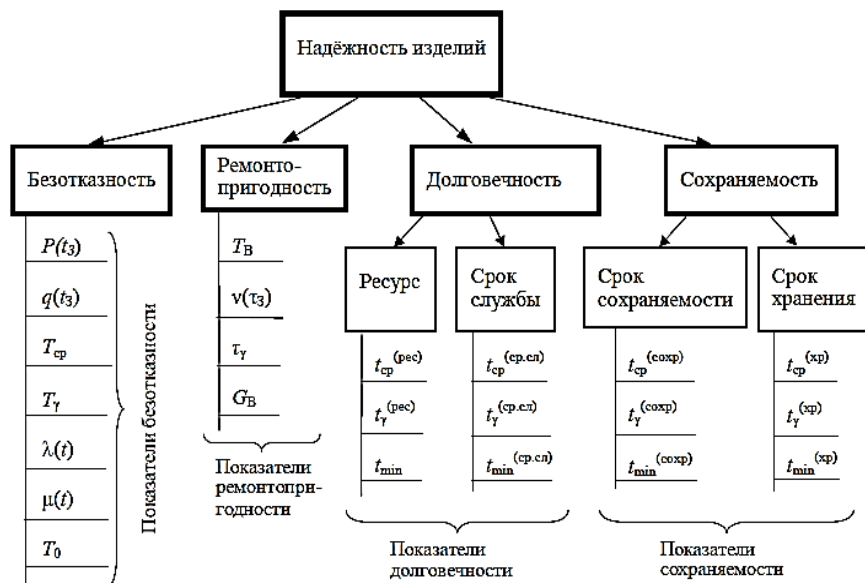


Рис. 1. Основные составляющие и показатели надёжности

Пояснения показателей надёжности

Обозначение показателя	Пояснение показателя надёжности
Показатели безотказности	
$P(t_3)$	Вероятность безотказной работы за заданное (интересующее) время t_3
$q(t_3)$	Вероятность отказа за заданное время t_3
T_{cp}	Средняя наработка до отказа. Если наработка выражается временем, то показатель называют средним временем безотказной работы
T_γ	Гамма-процентная наработка до отказа (обычно $\gamma \geq 90\%$)
$\lambda(t)$	Интенсивность отказов, в общем случае является функцией времени. Используется в качестве основной справочной характеристики безотказности элементов, причём принимается $\lambda(t) = \lambda_0 = \text{const}$ при наработке, равной t_n (указывается конкретное значение t_n в часах)
T_0	Средняя наработка на отказ, кратко – наработка на отказ. Имеет физический смысл только для восстанавливаемых РЭУ
Показатели ремонтпригодности	
T_B	Среднее время восстановления РЭУ. Представляет математическое ожидание времени восстановления
$v(t_3)$	Вероятность восстановления РЭУ за заданное время t_3
τ_γ	Гамма-процентное время восстановления (обычно $\gamma \geq 90\%$)
G_B	Средние затраты на восстановление РЭУ. Показывает, сколько в среднем потребуется денежных средств на восстановление работоспособности РЭУ
Показатели долговечности	
$t_{cp}^{(pec)}$	Средний ресурс изделия. Представляет собой математическое ожидание ресурса изделий рассматриваемого типа
$t_\gamma^{(pec)}$	Гамма-процентный ресурс (обычно $\gamma \geq 90\%$)
t_{min}	Минимальная наработка. Характеризует ресурсные возможности изделия, считают, что t_{min} соответствует значению $t_\gamma^{(pec)}$ при $\gamma = 99,99\%$
$t_{cp}^{(cp.cn)}$	Средний срок службы изделия. Представляет собой математическое ожидание срока службы изделий рассматриваемого типа
$t_\gamma^{(cp.cn)}$	Гамма-процентный срок службы (обычно $\gamma \geq 90\%$)
$t_{min}^{(cp.cn)}$	Минимальный срок службы. Считают, что $t_{min}^{(cp.cn)}$ соответствует гамма-процентному сроку службы $t_\gamma^{(cp.cn)}$ при $\gamma = 99,99\%$

Показатели сохраняемости	
$t_{cp}^{(сохр)}$	Средний срок сохраняемости изделия. Представляет собой математическое ожидание срока сохраняемости изделий рассматриваемого типа
$t_{\gamma}^{(сохр)}$	Гамма-процентный срок сохраняемости (обычно $\gamma \geq 90\%$)
$t_{min}^{(сохр)}$	Минимальный срок сохраняемости. Считают, что $t_{min}^{(сохр)}$ соответствует значению $t_{\gamma}^{(сохр)}$ при $\gamma = 99,99\%$
$t_{cp}^{(хр)}$	Средний срок хранения изделия. Представляет собой математическое ожидание срока хранения изделий рассматриваемого типа
$t_{\gamma}^{(хр)}$	Гамма-процентный срок хранения (обычно $\gamma \geq 90\%$)
$t_{min}^{(хр)}$	Минимальный срок хранения. Считают, что $t_{min}^{(хр)}$ соответствует гамма-процентному сроку хранения $t_{\gamma}^{(хр)}$ при $\gamma = 99,99\%$

Практическое задание:

1. Изучите основные группы показателей надежности и их символично-буквенные обозначения
2. Поясните, в каких единицах измерения оцениваются параметры надежности. Приведите примеры.
3. Ответьте на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы:

1. Какие существуют основные показатели надежности?
2. Перечислите рекомендации по обеспечению технической надежности сложной автоматизированной системы.
3. Перечислите рекомендации по обеспечению эксплуатационной надежности автоматизированных систем:
4. Дайте определение единичного и комплексного показателей надежности.
5. Поясните основные виды показателей надежности.
6. Почему средняя наработка на отказ T_0 имеет смысл только для восстанавливаемых объектов.

ЕДИНИЧНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ И РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ

Цель: исследуйте единичные показатели безотказности и ремонтпригодности радиоэлектронного изделия.

Вероятность безотказной работы. Под вероятностью безотказной работы изделия за время t_3 понимают вероятность вида

$$P(t_3) = \text{Вер} \{T \geq t_3\}, \quad (1)$$

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

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

$$P(t_3) = \int_{t_3}^{\infty} w(t) dt. \quad (2)$$

Геометрическая интерпретация выражения (2) понятна из рисунка 2.

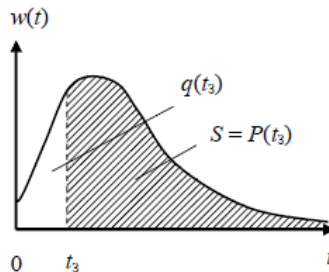


Рис. 2. К определению вероятностей $P(t_3)$ и $q(t_3)$

Для экспоненциального распределения времени до отказа с использованием выражения (2) можно получить

$$P(t_3) = e^{-\lambda t_3}, \quad (3)$$

где λ – параметр экспоненциального распределения для рассматриваемого изделия.

Формулой (3) широко пользуются в инженерных расчётах надёжности. Она также известна под названием *экспоненциальный закон надёжности*.

Интенсивность отказов. Под интенсивностью отказов элементов для интервала времени Δt_i понимают значение условной плотности распределения времени до отказа при условии, что к началу рассматриваемого момента времени Δt_i отказов не было. На основе экспериментальных данных *интенсивность отказов* численно можно определить как

$$\lambda_i^* = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{\text{ср } i} \cdot \Delta t_i}, \quad (4)$$

где $n(\Delta t_i)$ – количество элементов, отказавших в i -м временном интервале;

$N_{\text{ср } i}$ – среднее количество элементов, безотказно работавших в i -м временном интервале;

Δt_i – ширина i -го временного интервала.

Среднее время безотказной работы. Надёжность однотипных РЭУ (серийного производства) или элементов по продолжительности их эксплуатации до первого отказа характеризуется средней наработкой без отказа, под которой понимают математическое ожидание времени безотказной работы. В общем, этот параметр называется средним временем до отказа, поскольку он представляет собой математическое ожидание (среднее значение) случайной величины – время до отказа. Этот показатель можно использовать для любого изделия:

восстанавливаемого и невосстанавливаемого в процессе эксплуатации.

Гамма-процентная наработка до отказа. Под ней понимают наработку, в течение которой отказ в изделии не возникнет с вероятностью γ , выраженной в процентах. Запись в технической (конструкторской) документации: «90-процентная наработка до отказа составляет не менее 500 ч» означает, что у 90 % изделий указанного вида в течение суммарной наработки, равной 500 ч, отказ не возникнет.

Наработка на отказ (средняя наработка на отказ). Рассмотрим процессы функционирования и устранения отказов РЭУ (одного экземпляра) в течение некоторого календарного периода на временной оси (Рисунок 3).

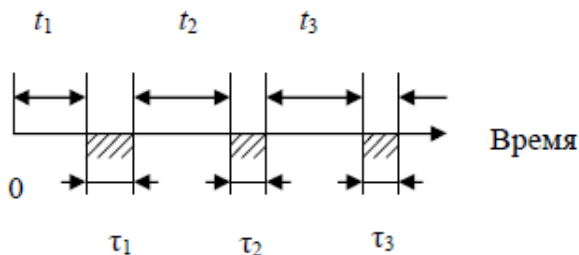


Рис. 3. Процесс функционирования РЭУ:
 t_1, t_2, t_3 – интервалы безотказной работы РЭУ;
 τ_1, τ_2, τ_3 – интервалы по устранению отказов

Тогда наработку на отказ T_0 можно определить как

$$T_0 = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{m}, \quad (5)$$

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

Показатель T_0 имеет физический смысл только для восстанавливаемых устройств (комплексное свойство

ремонтпригодности). Его более полно называют *средней наработкой на отказ*, что понятно из выражения (5).

Показатели T_0 и $T_{\text{ср}}$ по своей физической сущности различны, однако в случае *экспоненциального* распределения времени до отказа они *совпадают по значению* и соответствуют примерно 37 %-й наработке до отказа ($\gamma \approx 37 \%$). Это означает, что примерно 37 % РЭУ данного вида проработают без отказа в течение времени $t \geq T_0$ [11]. Можно также показать, что при экспоненциальном распределении времени до отказа справедливы соотношения (6):

$$T_{\gamma=90\%} \approx 0,1T_0; \quad T_{\gamma=99\%} \approx 0,01T_0; \quad T_{\gamma=99,9\%} \approx 0,001T_0. \quad (6)$$

Вероятность восстановления РЭУ. Под вероятностью восстановления устройства (изделия) за заданное время τ_3 понимают вероятность вида

$$\nu(\tau_3) = \text{Вер}\{T \leq \tau_3\}, \quad (7)$$

где T – случайное время восстановления устройства.

Формулы расчёта значений вероятности $\nu(\tau_3)$ на прямую зависят от закона распределения времени восстановления. Обычно пользуются гипотезой об экспоненциальном распределении времени восстановления, однако могут быть и другие законы распределения. В этом случае расчётная формула имеет вид:

$$\nu(\tau_3) = 1 - e^{-\tau_3/T_B}, \quad (8)$$

где T_B – среднее время восстановления.

Среднее время восстановления. Под ним понимают математическое ожидание (среднее арифметическое) времени восстановления работоспособного состояния РЭУ после отказа.

Среднее время восстановления определяется по аналогии с показателем T_0 (см. рис. 3):

$$T_B = \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m \tau_i \right). \quad (9)$$

Значение T_B показывает, сколько в среднем затрачивается времени на обнаружение и устранение одного отказа. Затраты

времени, связанные с решением организационных и логистических вопросов, поиском и доставкой нужных элементов и т. п., во время T_B не учитываются.

Практическое задание:

1. Исследуйте единичные показатели безотказности и ремонтпригодности радиоэлектронного изделия
2. Интерпретируйте геометрический смысл функции плотности распределения времени t_3 до отказа $w(t)$ представленной формулой (2) по рисунку 2.
3. Ответьте на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы:

1. Введите понятие вероятности безотказной работы, интенсивности отказов.
2. Назовите экспоненциальный закон надежности.
3. Что понимают под средним временем безотказной работы РЭУ?
4. Что понимают под гамма-процентной наработкой до отказа?
5. Чем отличаются параметры T_0 и T_{cp} ?
6. Что понимают под вероятностью восстановления РЭУ?
7. Что показывает параметр T_B ?

АНАЛИЗ ЗАДАЧИ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ РЭУ

Цель: проведите анализ задачи расчета надежности исследуемого модуля РЭУ

Для анализа задачи расчета надежности РЭУ необходимо учитывать несколько основных аспектов:

1. Идентификация потенциальных отказов и их вероятности. Необходимо проанализировать все элементы РЭУ и определить вероятность их отказа.

2. Определение последствий отказов. Необходимо оценить, какие последствия могут произойти в случае отказа различных элементов РЭУ, такие как прерывание поставки электроэнергии, потеря рабочих процессов и т. д.

3. Расчет надежности системы. На основе вероятностей отказов и их последствий необходимо произвести расчет надежности РЭУ, то есть вероятности того, что система будет функционировать без отказов в течение определенного времени.

4. Планирование мер по повышению надежности. На основе результатов анализа необходимо разработать и реализовать план мероприятий по увеличению надежности РЭУ, такие как замена старого оборудования, увеличение резервных мощностей, улучшение системы мониторинга и т. д.

При анализе задачи расчета надежности РЭУ необходимо учитывать как технические, так и экономические аспекты, так как повышение надежности системы обычно требует значительных инвестиций.

Для оценки безотказной работы устройства и расчета показателей надежности воспользуемся экспоненциальной характеристикой надежности. Она определяется экспоненциальным законом распределения времени между отказами (до отказа). В этом случае время до отказа распределяется по экспоненциальной модели.

Анализируя вероятность выхода из строя каждого элемента схемы на основе расчетного метода, мы получаем ряд величин – случайную величину, характеризующую вероятность выхода из строя конкретного элемента в зависимости от его размера и влияющих на него параметров окружающей среды. Затем анализируем все вероятности неудачи и находим общую суммарную вероятность отказа. В соответствии с полученным результатом находим расчетные значения таких параметров надежности, как:

- а) наработка на отказ;
- б) вероятность безотказной работы за определенное время;
- в) гамма-процентная наработка на отказ.

График экспоненциальной зависимости надежности устройства от времени приведен на рисунке 4.

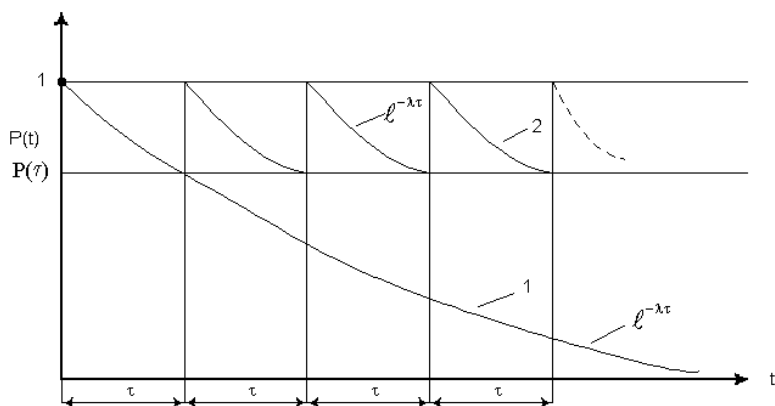


Рис. 4. График экспоненциальной характеристики надежности

В соответствии с графиком видно, что надежность устройства (изделия) снижается с увеличением времени его эксплуатации. Модель экспоненциального распределения часто используется для априорного анализа, так как позволяет с помощью не очень сложных расчетов получить простые зависимости для различных вариантов проектируемой системы. На этапе апостериорного анализа (экспериментальных данных) следует проверить соответствие экспоненциальной модели результатам испытаний.

Последовательность выполнения расчёта показателей безотказности

При выполнении расчета надежности (квалификационного проекта) используют уточнённый расчёт показателей безотказности, а при необходимости и показателей ремонтпригодности, восстанавливаемости проектируемого или модернизируемого РЭУ.

В случае сложных РЭУ (два и более блока, модуля и т. п.) порядок прогнозирования их надёжности расчётным методом определяется ГОСТ 27.301–95.

На следующем этапе определяются компоненты РЭУ – модули, как правило, на уровне печатных узлов (плат). Отдельная самостоятельная часть состоит из несущей конструкции с элементами коммутации и управления, межблочной установки и электротехнических компонентов, не входящих в состав печатных узлов. Рассчитывают показатели безотказной работы функциональных частей (модулей) и по этим полученным показателям оценивают безотказную работу РЭУ в целом.

Основными исходными данными для расчёта являются:

- электрические принципиальные схемы функциональных частей и устройства в целом, перечни элементов к схемам, их физические параметры (напряжение, сопротивление, мощность, сила тока и т.д.);
- спецификации к сборочным единицам и сборочные чертежи функциональных частей и РЭУ в целом;

- результаты расчёта теплового режима РЭУ с указанием значений перегрева в нагретой зоне Δt_3 и среднего перегрева внутри устройства Δt_B ;

- информация о категории исполнения по ГОСТ 15150–69 и объекте размещения РЭУ или указание о требованиях к климатическим факторам и механическим воздействиям по другим ГОСТам либо численное описание этих условий и требований;

- карты электрических режимов работы элементов (желательно);

- информация об уровне качества исполнения элементов (виде приёмки элементов в условиях производства).

Рассмотрим рекомендуемую последовательность расчёта показателей безотказности.

В рассматриваемом РЭУ выделяют функциональные части, которые с точки зрения надёжности будут рассматриваться как самостоятельные и независимые.

Для каждой (i -й) выделенной части (модуля) последовательно выполняют следующие действия.

1. Используя перечни элементов и (или) спецификации, а при необходимости и техническую документацию на элементы, выясняют значение их электрических и эксплуатационных характеристик (напряжение, сопротивление, мощность, ток и т.п.), необходимых для выбора или расчета поправочных коэффициентов используется в математических моделях для расчета (прогнозирования) интенсивности эксплуатационных отказов элементов. Для ИМС необходимо хотя бы примерно уточнить количество элементов в ИМС или количество разрядов (для ИМС памяти ОЗУ, ПЗУ).

2. С помощью карт электрических режимов или методом экспресс анализа электрических схем на основе законов Ома находят коэффициенты электрической нагрузки элементов. Допускается погрешность до 20 %. Если какая-то ИМС работает в

облегчённом режиме, то рассчитывают коэффициент облегчения режима $K_{\text{обл}}$.

3. Определяют максимально возможную температуру элементов при работе в составе РЭУ: для теплонагруженных элементов – с учётом значения Δt_3 , для не теплонагруженных – с учётом значения $\Delta t_в$.

4. Дают оценку эксплуатационной интенсивности отказов λ_3 радиоэлектронных элементов. Для этого для каждого элемента последовательно выполняют следующее:

- находят справочное значение интенсивности отказов группы элементов, в которую входит рассматриваемый элемент;

- уточняют математическую модель расчёта эксплуатационной интенсивности отказов λ_3 ;

- в зависимости от класса и группы, в которую входит рассматриваемый элемент, его характеристик и особенностей, а также условий эксплуатации РЭУ и вида приёмки элемента (при его изготовлении в условиях производства) определяют значения поправочных коэффициентов, входящих в выбранную модель расчёта эксплуатационной интенсивности отказов λ_3 ;

- выполняют расчёт (прогнозирование) λ_3 .

6. Если печатная плата имеет металлизированные отверстия, то интенсивность ее эксплуатационной отказности определяют с учетом количества запаянных металлизированных отверстий; также учитывается тип доски (односторонняя, двухсторонняя, многослойная).

7. Определяют эксплуатационную интенсивность отказов соединений пайкой на печатной плате для отверстий, где нет металлизации.

8. С помощью обычного суммирования значений λ_3 элементов и компонентов подсчитывают эксплуатационную интенсивность отказов i -й функциональной части (модуля) Λ_3 ; $i = 1, \dots, N$, где N – количество модулей.

При расчёте величины $\Lambda_{\text{Э}i}$ элементы, одного функционального назначения с одинаковыми электрическими режимами, конструктивно-технологическими и другими факторами могут объединяться в группы однотипных элементов с учетом их количества. В этом случае значение $\Lambda_{\text{Э}i}$ для i -го модуля определяют по выражению

$$\Lambda_{\text{Э}i} = \sum_{j=1}^k \lambda_{\text{Э}j} \cdot n_j, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{Э}j}$ – эксплуатационная интенсивность отказов элементов j -й группы; n_j – количество элементов в j -й группе; в предельном случае в каждой группе может быть всего лишь по одному элементу; k – число сформированных групп однотипных элементов.

Для соединений пайкой на печатной плате для отверстий, где нет металлизации, количество элементов в j -й группе всегда больше единицы ($n_j > 1$).

Эксплуатационную интенсивность отказов РЭУ в целом определяют суммированием значений $\Lambda_{\text{Э}i}$.

$$\Lambda_{\text{РЭУ}} = \Lambda_{\text{Э}1} + \Lambda_{\text{Э}2} + \dots + \Lambda_{\text{Э}N}. \quad (2)$$

Если в составе РЭУ имеются одинаковые модули, то для расчёта величины $\Lambda_{\text{РЭУ}}$ вместо (2) может использоваться выражение (3):

$$\Lambda_{\text{РЭУ}} = \sum_{i=1}^v \Lambda_{\text{Э}i} \cdot m_i, \quad (3)$$

где m_i – количество модулей i -го вида в составе РЭУ; v – число разновидностей модулей (узлов).

Практическое задание:

1. Изучите основные термины и определения, классификацию отказов и их математическое описание.
2. Приведите примеры отказов объектов автоматизации в соответствии с видами отказов, представленных в таблице 1.
3. Ответьте на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы:

1. Введите понятие надежности. Перечислите свойства изделий в аспекте надежности.
2. Дайте определение понятию отказ, наработка, безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.
3. Прокомментируйте виды отказов и способы их классификации.
4. Математическое описание отказов.

ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ КАК ОСНОВНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БЕЗОТКАЗНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ. КОЭФФИЦИЕНТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ЭЛЕМЕНТОВ

Цель: обоснуйте выбор основной характеристики безотказности элементов, проведите расчет коэффициентов электрической нагрузки исследуемого РЭУ.

При расчёте показателей надёжности устройств (изделий) необходимо располагать справочными данными о показателях надёжности элементов.

В настоящее время основной эталонной *характеристикой безотказности элементов*, приводимой в технических условиях или других технических документах, является интенсивность отказов λ_0 . Значение λ_0 принимается постоянным в течение определённой наработки, также указываемой в технической документации, и соответствует номинальному электрическому режиму и нормальным (лабораторным) условиям эксплуатации, если иное не указано явно.

Ранее (примерно до 80-х годов прошлого века) приводимые значение λ_0 характеризовали безотказность элементов с точки зрения только внезапных отказов.

На сегодняшний день значения λ_0 , приводимые в технической документации и справочниках по надёжности, характеризуют безотказность элементов с учётом как внезапных, так и постепенных отказов [10–12]. Обоснование выбора λ_0 в качестве

основной справочной характеристики безотказности элементов приводится в [1].

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

Справочные значения λ_0 современных российских и иностранных элементов занимают диапазон примерно $10^{-10} \dots 10^{-5} 1/\text{ч}$.

За рубежом для высоконадёжных элементов радиоэлектроники в качестве размерности λ стали использовать фит: 1фит = $10^{-9} 1/\text{ч}$.

Коэффициент электрической нагрузки элементов

Этот коэффициент показывает, насколько элемент или устройство электрической системы нагружает её в целом. Он может быть выражен как отношение активной или реактивной мощности элемента к средней или максимальной мощности системы. Этот коэффициент используется для оптимизации и распределения нагрузки в электрических системах.

Реальный уровень безотказности элементов зависит от коэффициентов их электрической нагрузки, определяемых отношением

$$K_{\text{н}} = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{ном}}}, \quad (1)$$

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

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

В качестве F выбирают такую электрическую характеристику элемента, которая является ключевой и в наибольшей степени влияет на его безотказность (табл. 3.).

Недопустимо использовать в схемах элементы с коэффициентом электрической нагрузки $K_{\text{н}} > 1$ даже по одному из параметров электрического режима. Считают [1], что для типовых элементов РЭС оптимальные значения коэффициентов нагрузки определяются в интервале $K_{\text{н.опт}} \approx 0,2 \dots 0,6$.

Понятие коэффициента нагрузки для интегральных микросхем напрямую на практике не используется. Каждая ИС включает в себя определенное количество элементов, коэффициенты электрической нагрузки которых определяются внутренней структурой (электрической схемой) и конструктивно-технологическими особенностями изготовления ИС. Значения коэффициентов нагрузки элементов учтены справочным значением интенсивности отказов λ_0 ИМС в целом. Приводимые λ_0 соответствуют условиям типовой (усреднённой) электрической нагрузки ИМС и температуре окружающей среды $t=+25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Однако в ряде случаев некоторые группы (типы) ИМС допускают работу в более легких режимах, чем стандартные, например, использование аналоговых ИМС при пониженном напряжении питания, что повышает их эксплуатационную надежность. Повышение эксплуатационной надежности (снижение интенсивности эксплуатационных отказов) ИМС, применяемых в легких режимах, можно учесть с помощью коэффициента $K_{\text{обл}}$, который представляет собой отношение рабочей электрической нагрузки к предельно допустимой (номинальной). В этом случае коэффициент $K_{\text{обл}}$ можно рассматривать как своеобразный аналог коэффициента загрузки K_H ИМС в целом.

Таблица 3

**Электрические характеристики, используемые для
определения K_H**

Группа элементов	Характеристика F	Группа элементов	Характеристика F
1. Резисторы	Рассеиваемая мощность	7. Тиристоры	Средний прямой ток, рассеиваемая мощность
2. Конденсаторы	Прикладываемое напряжение	8. Трансформаторы	Мощность
3. Варикапы подстроечные. Транзисторы, транзисторные сборки. Диоды СВЧ	Рассеиваемая мощность	9. Дроссели, катушки индуктивности	Ток подмагничивания или протекающий ток
4. Диоды, кроме стабилитронов, диодные сборки	Средний прямой ток	10. Реле	Коммутируемый ток
5. Полупроводниковые (ПП) знакосинтезирующие индикаторы, оптопары, ППИ излучатели	Средний прямой ток	11. Соединители (разъёмы), элементы коммутации (переключатели, тумблеры, кнопки и т.п.)	Протекающий ток
6. Стабилитроны	Ток стабилизации, рассеиваемая мощность	12. Кабели, шнуры, монтажные провода	Плотность тока в проводе

Практическое задание:

1. Обоснуйте выбор основной характеристики безотказности элементов – интенсивности отказов.
2. Проведите расчет коэффициентов электрической нагрузки исследуемого РЭУ. Варианты заданий представлены в Приложении 1.
3. Ответьте на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы:

1. Назовите показатели надежности элементов РЭУ.
2. Почему интенсивность отказов λ_0 является основной характеристикой безотказности элементов?
3. При определении интенсивности отказов λ_0 учитывают внезапные или постепенные отказы?
4. Какова размерность интенсивности отказов λ_0 ? Что такое фит?
5. От чего зависит реальный уровень безотказности элементов?

6. Назовите соотношение для определения коэффициентов электрической нагрузки, поясните его компоненты.
7. Можно ли использовать в АС элементы, с коэффициентами электрической нагрузки $K_n > 1$?
8. В каких пределах лежат оптимальные значения K_n ?

МЕТОДЫ РАСЧЁТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Цель: изучить методы расчёта показателей безотказности и ремонтпригодности и выбрать методику для определения надежности исследуемого РЭУ

Существующие методы расчета показателей надежности и ремонтпригодности электронных устройств могут различаться степенью точности учета электрического режима, условий эксплуатации, конструктивных, технологических, функциональных и других особенностей элементов, входящих в состав исследуемого устройства.

Существует несколько методов расчета показателей надежности, которые используются в различных областях инженерии. Некоторые из основных методов включают в себя:

1. Методы на основе статистики отказов и время между отказами (MTBF):

- Расчет среднего времени наработки на отказ (MTBF) и среднего времени восстановления (MTTR).

- Анализ данных об отказах, чтобы определить вероятность отказа в определенный период времени.

2. Аналитические методы:

- Использование математических моделей для определения надежности системы, как, например, через экспоненциальное распределение, гамма-распределение и др.

3. Метод Марковских процессов:

- Использование математической модели, основанной на теории графов, для определения вероятности отказа или ненадежности системы в зависимости от ее текущего состояния.

4. Моделирование и симуляция:

- Использование программных средств для проведения компьютерного моделирования работы системы в условиях эксплуатации и оценки ее надежности.

Каждый из этих методов имеет свои преимущества и ограничения и может быть применим в различных ситуациях в зависимости от области применения и доступных данных.

Расчеты делятся на предварительные (примерные или приближительные) и окончательные.

Приближённые выполняют на ранних стадиях моделирования и проектирования, обычно на стадии эскизного проекта (ЭП), окончательные – на стадии технического проекта (ТП). На практике используют различные виды приближённого расчёта показателей надежности. Простейший из них описан в [1]. В этом случае учёт электрического режима, температуры, других климатических параметров окружающей среды и факторов, влияющих на эксплуатационную безотказность элементов, выполняется приближённо с помощью обобщённого эксплуатационного коэффициента $K_{э.об.}$. Значение этого коэффициента зависит от вида РЭУ и условий его эксплуатации (табл. 4.).

Примечание. В скобках указаны значения, рекомендуемые для использования в расчётах надежности в случае недостаточности данных об условиях эксплуатации и внешних воздействий.

Таблица 4

Значения обобщённого эксплуатационного коэффициента $K_{Э.об}$ [1]

Вид РЭУ, условия эксплуатации	Значение $K_{Э.об}$
Лабораторные условия	1,0
Помещения с регулируемой температурой и влажностью	1,1
Космос (на орбите)	1,5
Наземные стационарные условия	2...4,7 (2,5)
Наземные возимые РЭУ	4...7 (5,0)
Наземные подвижные (переносимые) РЭУ	7...15 (7,0)
Морские защищённые условия	7...12 (7,6)
Морские незащищённые условия	7...15 (10,0)
Бортовые самолётные РЭУ	5...10 (7,0)
Запуск ракеты	10...44 (20,0)

Суммарную итоговую интенсивность отказов РЭУ с учётом электрического режима и условий эксплуатации $\Lambda_{РЭУ}$ определяют как

$$\Lambda_{РЭУ} = K_{Э.об} \cdot \sum_{j=1}^k \lambda_{0j} n_j,$$

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

k – число сформированных групп однотипных элементов; n_j – количество элементов в j -й группе, $j = 1, \dots, k$.

Другие показатели безотказности подсчитывают по определенным формулам для экспоненциального распределения времени до отказа РЭУ (табл. 4.) [1, 4].

Показатели долговечности оценивают (рассчитывают) один раз на любой стадии опытно-конструкторских работ (ОКР), если это указано в договоре на выполнение ОКР.

В промышленности, на производстве находит применение разновидность *приближённого расчёта* показателей безотказности и ремонтпригодности, в которой используют значения эксплуатационных интенсивностей элементов $\lambda_{э}$ при

коэффициенте нагрузке $K_H=0,7$ для активных и $K_H=0,4$ для пассивных элементов, а рабочую температуру принимают равной 35°C .

Таблица 5

Расчёт показателей безотказности

Показатель безотказности	Расчётная формула
Наработка на отказ	$T_0 = \frac{1}{\Lambda_{\text{РЭУ}}}$
Вероятность безотказной работы за заданное время t_3	$P_{\text{РЭУ}}(t_3) = e^{-t_3 \cdot \Lambda_{\text{РЭУ}}} = e^{-t_3/T_0}$
Среднее время безотказной работы устройства (средняя наработка до отказа)	$T_{\text{ф}} = T_0$
Гамма-процентная наработка до отказа T_γ	$T_\gamma = -\frac{\ln(\gamma/100)}{\Lambda_{\text{РЭУ}}} = -T_0 \ln(\gamma/100)$

При выполнении *уточнённого расчёта* значения эксплуатационных интенсивностей отказов элементов модуля (узла) определяют для фактических значений параметров электрической нагрузки и указанных условий эксплуатации.

При уточнённом расчёте суммарную интенсивность отказов РЭУ в виде электронного модуля (печатного узла) Λ_M находят суммированием прогнозных значений эксплуатационных интенсивностей отказов элементов $\lambda_{\text{Э}}$:

$$\Lambda_M = \sum_{i=1}^N \lambda_{\text{Э}i},$$

где $\lambda_{\text{Э}i}$ – эксплуатационная интенсивность отказов i -го элемента (компонента), найденная с учётом его электрического режима, условий функционирования в составе РЭУ, конструкторско-технологических, функциональных и других особенностей;

N – количество элементов (компонентов) в модуле.

Пользуясь полученным значением Λ_M , можно подсчитать необходимые показатели безотказности модуля.

Практическое задание:

1. Изучить методы расчёта показателей безотказности и ремонтпригодности и выбрать методику для определения надежности исследуемого РЭУ
2. Поясните предварительные (приближённые или ориентировочные) и окончательные методы расчета.
3. Ответьте на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы:

1. Чем отличаются различные методы расчета показателей безотказности и ремонтпригодности РЭУ.
2. В чем состоит суть приближенного расчета показателей безотказности и ремонтпригодности РЭУ?
3. Перечислите показатели безотказности, применяемые при экспоненциальном законе распределения времени до отказа РЭУ.
4. Как определяются показатели долговечности?
5. При каких значениях коэффициента электрической нагрузки применяется приближенный метод расчета?

МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ

Цель: изучить математические модели определения значений эксплуатационной интенсивности отказов λ_{Σ} различных групп радиоэлементов и выбрать модели элементов, входящих в исследуемый модуль

В теории надежности используются разнообразные модели прогнозирования безотказности элементов:

1. Модель экспертных оценок: В этой модели эксперты используют свой опыт и знания для оценки вероятности безотказной работы элементов. Экспертная модель основана на коллективном мнении специалистов, что позволяет учесть различные аспекты и факторы, влияющие на безотказную работу элементов.

2. Модель выживаемости: Эта модель основана на анализе выживаемости элементов во времени. Она использует различные статистические методы для оценки вероятности безотказной работы элементов на основе наблюдений за их эксплуатацией.

3. Модель надежности системы: Эта модель прогнозирует безотказную работу элементов как часть целой системы. Она учитывает взаимодействие между элементами и их влияние на надежность всей системы.

4. Модель машинного обучения: Эта модель использует алгоритмы машинного обучения для анализа данных об эксплуатационной безотказности элементов и прогнозирования их

будущей надежности. Модель обучается на исторических данных и может учитывать различные виды влияющих факторов.

5. Модель байесовского анализа: Эта модель основана на теории байесовского анализа, который позволяет обновлять прогнозы на основе новой информации. Она учитывает априорные знания о безотказной работе элементов и обновляет их на основе новых данных.

Общая характеристика моделей

Для расчёта значения эксплуатационной интенсивности отказов λ_{Σ} большинства групп элементов (компонентов) изделия используется следующая математическая модель:

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma} \prod_{i=1}^m K_i,$$

где λ_{Σ} – базовая интенсивность отказов элементов данной группы; K_i – коэффициенты, учитывающие изменения эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов; m – количество учитываемых факторов.

Для конкретных групп сложных электротехнических и радиоизделий (ЭРИ), суммарный поток отказов которых состоит из независимых потоков отказов компонентов ЭРИ (например, электромагнитной катушки и контактной системы реле), разработана математическая модель расчета эксплуатационного отказа:

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma 1} \prod_{i=1}^{m_1} K_i^{(1)} + \dots + \lambda_{\Sigma n} \prod_{i=1}^{m_n} K_i^{(n)},$$

где $\lambda_{\Sigma j}$ – исходная (базовая) интенсивность отказов j -й части изделия, $j = 1, \dots, n$; n – количество составных частей изделия; $K_i^{(j)}$ – коэффициент, учитывающий влияние i -го фактора для j -й части изделия; $i = 1, \dots, m$; $j = 1, \dots, n$; m_j – число факторов, учитываемых для i -й части изделия.

Эта формула учитывает, что разные детали (компоненты) электронных модулей могут иметь разные значения

коэффициентов, учитывающих влияние одного и того же фактора, в частности уровня качества изготовления в условиях производства (вид приемки) или условий эксплуатации КЭ. Например, электромагнитная катушка реле может изготавливаться с уровнем качества, определяемым приёмкой «1», на одном предприятии, а контактная система и сборка реле в целом могут выполняться с приёмкой «3» на другом предприятии и т.п.

Конкретная запись типа математической модели элементов зависит также от конструктивных особенностей элемента и количества задействованных деталей (например, контактов в случае коммутационных изделий или разъемов). Отдельные (для компонентов) составляющие интенсивности отказов $\lambda_{\text{Б}}$, называемое базовой интенсивностью отказов, могут быть взяты из справочников или рассчитаны по моделям, приведенным в соответствующих разделах пособия.

В таблице 5 приведены математические модели, рекомендуемые для расчёта (прогнозирования) значений $\lambda_{\text{Э}}$ типовых элементов РЭС производства стран СНГ. При систематизации этих моделей в основу были положены справочники по надёжности, разработанные в России [11, 12]. Уточнение данных моделей было сделано на основе всестороннего анализа и систематизации руководств военных справочников и стандартов США, Франции и Китая [13–15]. Пояснение величин, входящих в математические модели, даётся в таблице 6.

Таблица 6

Математические модели определения значений λ_3

Класс (группа) элементов	Вид математической модели
Интегральные микросхемы (типовой электрический режим работы)	$\lambda_3 = \lambda_B K_I K_{ИС} K_{корп} K_V K_3 K_{\Pi}$
Интегральные микросхемы, работающие в облегчённых электрических режимах	$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_{ИС} K_{корп} K_V K_3 K_{\Pi}$
Диоды, кроме стабилитронов. Диодные сборки	$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_{\Phi} K_{Д} K_U K_3 K_{\Pi}$
Стабилитроны	$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_3 K_{\Pi}$

Класс (группа) элементов	Вид математической модели
Прочие элементы и компоненты	
Резонаторы пьезоэлектрические	$\lambda_3 = \lambda_B K_I K_3 K_{\Pi}$
Предохранители	$\lambda_3 = \lambda_B K_I K_3 K_{\Pi}$
Платы со сквозными металлизированными отверстиями (пайки отверстий)	$\lambda_3 = \lambda_B [N_1 K_{св} + N_2 (K_{св} + 13)] K_I K_3 K_{\Pi}$
Соединения, в том числе пайкой ²	$\lambda_3 = \lambda_B K_I K_3 K_{\Pi}$
Электрические лампочки	$\lambda_3 = \lambda_B K_3 K_{\Pi}$, принимается $K_3 = 1$
Кабели, шнуры, монтажные провода	$\lambda_3 = \lambda_B L K_T K_3 K_{\Pi}$

Класс (группа) элементов	Вид математической модели
Транзисторы биполярные, транзисторные сборки	$\lambda_3 = \lambda_5 K_p K_\phi K_d K_U K_3 K_\Pi$
Транзисторы полевые	$\lambda_3 = \lambda_5 K_p K_\phi K_3 K_\Pi$
Тиристоры	$\lambda_3 = \lambda_5 K_p K_d K_3 K_\Pi$
Диоды СВЧ	$\lambda_3 = \lambda_5 K_p K_d K_3 K_\Pi$
Транзисторы биполярные мощные СВЧ	$\lambda_3 = \lambda_5 K_i K_f K_\phi K_3 K_\Pi$
Оптоэлектронные элементы (светодиоды, оптопары)	$\lambda_3 = \lambda_5 K_p K_3 K_\Pi$
Микросхемы оптоэлектронные (типовой электрический режим работы)	$\lambda_3 = \lambda_5 K_3 K_\Pi$
Конденсаторы неполярные, оксидно-электролитические, кроме импульсных	$\lambda_3 = \lambda_5 K_p K_c K_3 K_\Pi$
Оксидно-электролитические импульсные	$\lambda_3 = \lambda_5 K_i K_c K_3 K_\Pi$
Резисторы постоянные: металлодиэлектрические металлизированные, композиционные	$\lambda_3 = \lambda_5 K_p K_R K_M K_\Delta K_3 K_\Pi$ $\lambda_3 = \lambda_5 K_p K_R K_3 K_\Pi$
Резисторы переменные: проволочные	$\lambda_3 = \lambda_5 K_p K_R K_3 K_\Pi$
непроволочные	$\lambda_3 = \lambda_5 K_p K_R K_U K_3 K_\Pi$
Терморезисторы	$\lambda_3 = \lambda_5 K_3$
Элементы коммутации (переключатели, тумблеры, кнопки и т.п.)	$\lambda_3 = (\lambda_5^{(кз)} K_K K_F + \lambda_5^{(ак)} NF) K_p K_3 K_\Pi$
Соединители (разъёмы): низкочастотные	$\lambda_3 = \lambda_5 K_p K_K K_n K_3 K_\Pi$
радиочастотные	$\lambda_3 = \lambda_5 K_i K_K K_n K_3 K_\Pi$
Индикаторы	
полупроводниковые	$\lambda_3 = \lambda_5 K_p K_3 K_\Pi$
вакуумные люминесцентные	$\lambda_3 = \lambda_5 K_i K_3 K_\Pi$
другие индикаторы, ЭЛТ, кинескопы и т. п.	$\lambda_3 = \lambda_5 K_3 K_\Pi$
Трансформаторы	$\lambda_3 = \lambda_5 K_p K_3 K_\Pi$
Дроссели, катушки индуктивности	$\lambda_3 = \lambda_5 K_p K_3 K_\Pi$
Реле электромагнитные общего назначения	$\lambda_3 = (\lambda_5^{(l)} K_p^{(l)} K_f K_\Pi^{(l)} + \lambda_5^{(ам)} FK_p K_K K_\Pi) K_3$

Таблица 7

Пояснения величин (параметров), входящих в математические модели

Параметр	Пояснение
Составляющие, входящие в модели для всех видов элементов	
λ_B	Базовая интенсивность отказов элементов данной группы (или конкретного типа), отвечающая температуре окружающей среды $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и номинальной электрической нагрузке, т. е. значению коэффициента электрической нагрузки $K_N = 1$
K_R	Коэффициент режима работы, зависящий от электрической нагрузки (коэффициента K_N) и температуры корпуса элемента
K_t	Коэффициент, зависящий от температуры корпуса элемента (компонента)
K_{Σ}	Коэффициент эксплуатации, зависящий от жёсткости условий эксплуатации РЭУ
K_{Π}	Коэффициент приёмки, учитывающий степень жёсткости требований к контролю качества и правила приёмки элементов (компонентов РЭУ) в условиях производства
Составляющие, входящие в модели для интегральных микросхем (ИМС)	
$K_{\text{ИС}}$	Коэффициент, учитывающий количество элементов в ИМС или бит (для ИМС памяти)
$K_{\text{корп}}$	Коэффициент, учитывающий тип корпуса
K_U	Коэффициент, учитывающий напряжение питания для КМОП ИМС
Составляющие, входящие в модели для полупроводниковых приборов	
K_{Φ}	Коэффициент, учитывающий функциональный режим работы прибора
$K_{\text{Д}}$	Коэффициент, зависящий от значения максимально допустимой по ТУ нагрузки по мощности (или току)
K_U	Коэффициент, зависящий от отношения рабочего напряжения к максимально допустимому по ТУ (коэффициента нагрузки по напряжению)
Составляющие, входящие в модели для конденсаторов	
K_C	Коэффициент, зависящий от значения номинальной ёмкости
Составляющие, входящие в модели для резисторов	
K_R	Коэффициент, зависящий от значения номинального сопротивления
K_M	Коэффициент, зависящий от значения номинальной мощности (для металлодиэлектрических резисторов)
$K_{\text{доп}}$	Коэффициент, зависящий от значения допуска на сопротивление (для металлодиэлектрических резисторов)
K_U	Коэффициент, зависящий от отношения значения рабочего напряжения $U_{\text{раб}}$ на резисторе к максимально допустимому напряжению по ТУ ($U_{\text{ТУ}}$); $U_{\text{раб}} = \sqrt{P_{\text{раб}} R}$, где $P_{\text{раб}}$ – рабочая мощность, Вт; R – сопротивление, Ом

Составляющие, входящие в модели для изделий коммутации и соединителей	
K_K	Коэффициент, зависящий от количества задействованных контактов
K_n	Коэффициент, зависящий от количества сочленений-расчленений n (соединители)
t_n	Температура перегрева контактов по ТУ при максимальной токовой нагрузке. Используется для выбора коэффициента K_K
K_F	Коэффициент, учитывающий число коммутаций в час
$\lambda_B^{(к.и.)}$	Базовая интенсивность отказов коммуникационного изделия в целом, 1/ч
$\lambda_B^{(к.з.)}$	Дополнительная интенсивность отказов, приходящаяся на одно включение при работе коммуникационного изделия в составе РЭУ, 1/вкл.
L	Верхний индекс, означающий, что соответствующие величины относятся к электромагнитной катушке реле
$\lambda_B^{(ном.)}$	Интенсивность отказов реле, приходящаяся на одну коммутацию
F	Средняя частота переключений или коммутации изделия в час в РЭУ
N	Количество активных контактов (контактирующих точек)
Составляющие, входящие в модели для печатных плат с металлизированными сквозными отверстиями	
λ_B	Базовая интенсивность отказов межсоединений в зависимости от технологии
$K_{сз}$	Коэффициент, учитывающий количество слоёв n в плате
N_1	Количество сквозных отверстий, пропаянных способом «пайка волной»
N_2	Количество сквозных отверстий, пропаянных ручным способом
Составляющие, входящие в модели для шнуров, кабелей, монтажных проводов	
L	Длина кабельного изделия в РЭУ, м
K_T	Коэффициент, зависящий от рабочей температуры, материала, конструкции изоляции и оболочки
λ_B	Базовая интенсивность отказов кабельных изделий при температуре +25 °С, 1/ч · м (табл. 5.3)

Практическое задание:

1. Изучить математические модели определения значений эксплуатационной интенсивности отказов λ_3 различных групп радиоэлементов.
2. Обоснуйте выбор математических моделей элементов, входящих в исследуемый модуль (Приложение 1)
3. Ответьте на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы:

1. Дайте общую характеристику математической модели эксплуатационной интенсивности отказов.

2. Поясните вид математической модели расчёта эксплуатационной интенсивности отказов отдельных групп сложных электрорадиоизделий.

3. Поясните параметры, входящие в математические модели определения эксплуатационной интенсивности отказов различных групп элементов.

БАЗОВЫЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ГРУПП ЭЛЕМЕНТОВ И КОМПОНЕНТОВ РЭС

Цель: определить базовые интенсивности отказов групп элементов, входящих в исследуемый модуль

Интенсивность отказов – отношение количества вышедших из строя элементов (образцов оборудования, изделий, деталей, механизмов, устройств, агрегатов и т.п.) в единицу времени к среднему числу объектов, исправно работающих в данный период времени, при условии, что вышедшие из строя объекты не восстанавливаются и заменяются исправными.

Основные интенсивности отказов радиоэлементов определяются экспериментальным путем на заводе-изготовителе в стандартных условиях эксплуатации.

Интенсивность отказов в течение длительной эксплуатации не остается постоянной. В начальный период времени λ имеет большее значение вследствие скрытых дефектов, не обнаруженных из-за несовершенства производственного контроля и возможных нарушений правил эксплуатации при первоначальной наладке объекта. Затем значение интенсивности отказов уменьшается и остается почти постоянным в течение длительного срока. В конце срока службы λ возрастает из-за старения элементов устройства. На рисунке изображена зависимость интенсивности отказов от времени.



В таблице 7 приводятся базовые интенсивности отказов (λ_B) групп элементов (компонентов) РЭС.

Таблица 8

**Базовые интенсивности отказов групп элементов
и компонентов РЭС**

Группа элементов	$\lambda_B, \times 10^{-6} \text{ 1/ч}$
1. Интегральные микросхемы (ИМС)	
Полупроводниковые цифровые:	
логические, арифметические, микропроцессоры и микропроцессорные комплекты, регистры сдвига и др.	0,023
оперативные запоминающие устройства (ОЗУ)	0,030
постоянные запоминающие устройства (ПЗУ, ППЗУ, РПЗУ)	0,018
Полупроводниковые аналоговые	0,028
Гибридные ИМС	0,043
2. Полупроводниковые приборы (ППП)	
Диоды выпрямительные	0,091
Столбы (мосты) выпрямительные	0,21
Диоды импульсные	0,025
Варикапы подстроечные	0,022
Стабилитроны	0,0041
Транзисторы биполярные кремниевые, кроме СВЧ	0,044
Транзисторы полевые:	
кремниевые	0,065
арсенидогаллиевые	0,578
Тиристоры кремниевые	0,2
Диоды СВЧ:	
кремниевые (кроме умножительных и настроечных)	0,162
кремниевые умножительные и настроечные	1,61
арсенидогаллиевые	0,21
Транзисторы СВЧ малой и средней мощности	0,064
Транзисторы СВЧ большой мощности	0,18
3. Оптоэлектронные полупроводниковые приборы	
Фотодиоды на основе кремния	0,185
Фототранзисторы	0,15
Фоторезисторы на основе PbS	1,8
Диоды излучающие инфракрасного и видимого диапазона (светодиоды)	0,034
Оптопары диодные, транзисторные	0,051
Оптопары тиристорные, резисторные, микросхемы оптоэлектронные	0,19

Группа элементов	$\lambda_{\Sigma} \times 10^{-6} \text{ 1/ч}$
4. Знакоинтегрирующие индикаторы	
Индикаторы полупроводниковые ¹ :	
буквенно-цифровые	0,42
дисплей с диодной матрицей	0,21
Индикаторы вакуумные люминесцентные:	
цифровые	0,83
буквенно-цифровые	0,69
Индикаторы вакуумные накаливаемые цифровые	0,31
Индикаторы газоразрядные:	
цифровые	0,79
буквенно-цифровые	2,25
Индикаторы жидкокристаллические цифровые многоразрядные	0,88
5. Конденсаторы	
слюдяные	0,04
керамические	0,022
бумажные и металлобумажные	0,019
с органическим синтетическим диэлектриком	0,028
электролитические алюминиевые	0,173
6. Резисторы	
Резисторы постоянные непроволочные:	
металлодиэлектрические, металлизированные	0,044
композиционные	0,034
Резисторы переменные:	
непроволочные	0,179
проволочные	0,183
Терморезисторы	0,007
7. Элементы коммутации²	
Переключатели галетные	0,058 / 0,0027 (1/вкл.)
Тумблеры	0,1 / 0,0064 (1/вкл.)
Кнопки, кнопочные переключатели	0,16 / 0,009 (1/вкл.)
Микропереключатели	0,045/0,0019 (1/вкл.)
Переключатели на базе герконов	0,13 / 0,005 (1/вкл.)
Контакты магнитоуправляемые:	
замыкающего типа	0,0007 (1/сраб.)
переключающего типа	0,018 (1/сраб.)
8. Соединители (разъёмы):	
низкочастотные прямоугольные для печатного монтажа	0,0041
низкочастотные для объёмного монтажа	0,0104
радиочастотные с полиэтиленовой изоляцией	0,015
10. Прочие элементы и компоненты	
Трансформаторы:	
питания	0,0035
преобразователей напряжения	0,0072
согласующие, импульсные и др.	0,0019
Электронно-лучевые трубки:	
осциллографические, индикаторные	1,67
кинескопы монохромные	1,1
кинескопы цветные	13,17
Дроссели	0,033
Катушки индуктивности	0,01
Реле электромагнитные общего назначения ³	0,0304 (1/ком.)

Группа элементов	$\lambda_{\Sigma} \times 10^{-6} 1/\text{ч}$
Пьезоэлектрические приборы (кварцевые резонаторы, датчики, фильтры)	0,026
Линии задержки	0,04
Предохранители	0,011
Держатели предохранителей	0,003
Индикаторные электрические лампочки при минимальной продолжительности горения $T_{\min}$, указываемой в ТУ: при переменном напряжении до 12 В при постоянном напряжении до 12 В при переменном напряжении 200...240 В	1,8 5,4 77,8
Соединения (значения базовой интенсивности отказов): ручная пайка без накрутки ручная пайка с накруткой пайка волной обжимка (опрессовка) клеммный блок (узел)	0,0013 0,00007 0,000069 0,00012 0,062
Пайки сквозных металлизированных отверстий в платах с металлизированными отверстиями (значения базовой интенсивности отказов в зависимости от технологии межсоединений): печатный монтаж монтаж дискретными проводниками	0,000017 0,00011
Кабели, шнуры, провода монтажные (значения базовой интенсивности отказов)*: кабели (провода) радиочастотные коаксиальные провода монтажные низковольтные обычной теплостойкости шнуры питания гибкие с резиновой изоляцией (без вилок питания)	0,00127 (1/м) 0,0577 (1/м) 0,037 (1/м)

Интенсивность отказов является наиболее удобной для практического использования характеристикой надежности простейших радиоэлементов, поскольку она обеспечивает наиболее простой расчет числовых значений надежности сложной системы, а также ее легко рассчитать экспериментально при нормальной эксплуатации.

Интенсивность отказов может быть полезным показателем для оценки надежности системы и для планирования профилактических мероприятий для снижения частоты отказов.

Примечания:

1. Для ИМС базовые интенсивности отказов соответствуют ИС средней степени их интеграции не в пластмассовых корпусах, условиях типовой (усреднённой) электрической нагрузки и температуре окружающей среды $t = +25^\circ \text{C}$.

2. Для ППП, включая полупроводниковые индикаторы, интенсивность отказов соответствует приборам не в пластмассовых (полимерных) корпусах.

3. Приведено значение, приходящееся на один разряд индикатора (диодной матрицы).

4. Интенсивность отказов коммутационного изделия в целом (числитель) и дополнительная интенсивность отказов, приходящаяся на одно переключение при работе (знаменатель).

5. Интенсивность отказов, приходящаяся на одну коммутацию (срабатывание).

6. Базовая интенсивность отказов, приходящаяся на 1 метр длины.

Практическое задание:

1. Определить базовые интенсивности отказов групп элементов, входящих в исследуемый модуль

2. Составьте таблицу значений базовых интенсивностей отказов групп элементов, входящих в исследуемый модуль (Приложение 1).

3. Ответьте на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы:

1. Как определяются базовые интенсивности отказов типовых элементов?

2. Перечислите группы элементов таблицы 7.

3. Перечислите виды интегральных микросхем (ИМС).

4. Какие элементы относятся к полупроводниковым приборам?

5. Перечислите оптоэлектронные полупроводниковые элементы.

6. Что относится к знаковосинтезирующим индикаторам?

7. Перечислите виды конденсаторов и резисторов.

8. Перечислите виды элементов коммутации и разъемов.

9. Для каких прочих элементов и компонентов определяются базовые интенсивности отказов?

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЁТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ

Цель: изучить порядок выполнения расчета показателей безотказности исследуемого модуля

На практике при расчете показателей надежности, как правило, следует предусматривать уточненный расчет показателей надежности, а при необходимости и показателей ремонтпригодности проектируемого или модернизируемого РЭУ.

В случае сложных РЭУ (два и более блока, модуля и т. п.) порядок прогнозирования их надёжности расчётным методом определяется ГОСТ 27.301–95.

На первом этапе идентифицируются компоненты РЭУ – модули, обычно на уровне печатных узлов. Отдельная самостоятельная часть состоит из несущей конструкции с элементами коммутации и управления, межблочной установки и электротехнических компонентов, не входящих в состав печатных узлов.

На следующем этапе рассчитываются показатели безотказной работы функциональных частей (модулей) и по этим показателям оценивается безотказная работа РЭУ в целом.

Основными исходными данными для расчёта являются:

- электрические принципиальные схемы функциональных частей и устройства в целом, перечни элементов к схемам;
- спецификации к сборочным единицам и сборочные чертежи функциональных частей и РЭУ в целом;

- результаты расчёта теплового режима РЭУ с указанием значений перегрева в нагретой зоне Δt_3 и среднего перегрева внутри устройства Δt_B ;

- информация о категории исполнения (приемки) по ГОСТ 15150–69 и объекте размещения РЭУ (эксплуатации) или указание о требованиях к климатическим факторам и механическим воздействиям по другим ГОСТам либо численное описание этих требований;

- карты электрических режимов работы элементов (желательно);

- информация об уровне качества элементов (виде приёмки элементов в условиях производства).

Рекомендуемая последовательность расчёта показателей безотказности.

В рассматриваемом РЭУ выделяют функциональные части, которые с точки зрения надёжности будут рассматриваться как самостоятельные.

Для каждой (*i*-й) выделенной части (модуля) последовательно выполняют следующие действия.

1. Используя перечни элементов и (или) спецификации, а при необходимости и техническую документацию на элементы, выясняют значение их электрических и эксплуатационных характеристик, необходимых для выбора или расчета поправочных коэффициентов, используемых в математических моделях расчета (прогнозирования) интенсивности эксплуатационных отказов элементов. Для ИМС необходимо хотя бы примерно уточнить количество элементов в ИМС или количество битов (для ИМС памяти).

2. С помощью карт электрических режимов или метода экспресс-анализа электрических цепей находят коэффициенты электрической нагрузки элементов. Допускается погрешность до 20%. Если какая-либо ИМС работает в облегченном режиме, то рассчитывается коэффициент облегченного режима $K_{обл}$.

3. Определяют максимально возможную температуру элементов при работе в составе РЭУ: для теплонагруженных элементов – с учётом значения Δt_3 , для не теплонагруженных – с учётом значения $\Delta t_в$.

4. Определяют оценку эксплуатационной интенсивности отказов $\lambda_э$ элементов. Для этого для каждого элемента последовательно выполняют следующее:

- пользуясь таблицей 7, находят справочное значение интенсивности отказов группы элементов, в которую входит рассматриваемый элемент;

- по таблице 5 уточняют математическую модель расчёта эксплуатационной интенсивности отказов $\lambda_э$;

- в зависимости от класса и группы, к которой относится рассматриваемый элемент, его физических характеристик и особенностей, а также условий эксплуатации электронного блока управления и вида приемки элемента (при его изготовлении в производственных условиях) определяют значения поправочных коэффициентов, входящих в выбранную модель расчета эксплуатационной интенсивности отказов $\lambda_э$;

- выполняют расчёт надежности (прогнозирование) $\lambda_э$.

5. Если печатная плата имеет металлизированные отверстия, то ее эксплуатационную отказоустойчивость определяют по модели, приведенной в таблице 5, и с учетом количества спаек металлизированных отверстий.

6. Определяют эксплуатационную интенсивность отказов соединений пайкой на печатной плате для отверстий, где нет металлизации.

7. С помощью обычного суммирования значений $\lambda_э$ элементов и компонентов подсчитывают эксплуатационную интенсивность отказов i -й функциональной части (модуля) $\lambda_{эi}$; $i = 1, \dots, N$, где N – количество модулей.

При расчёте величины $\lambda_{эi}$ элементы одного функционального назначения с одинаковыми электрическими режимами,

конструктивно-технологическими и другими факторами могут объединяться в группы однотипных элементов. В этом случае значение $\lambda_{\varepsilon i}$ для i -го модуля определяют по выражению:

$$\Lambda_{\varepsilon i} = \sum_{j=1}^k \lambda_{\varepsilon j} \cdot n_j,$$

где $\lambda_{\varepsilon j}$ – эксплуатационная интенсивность отказов элементов j -й группы; n_j – количество элементов в j -й группе; в предельном случае в каждой группе может быть всего лишь по одному элементу; k – число сформированных групп однотипных элементов.

Для соединений пайкой на печатной плате для отверстий, где нет металлизации, количество элементов в j -й группе всегда больше единицы ($n_j > 1$).

Эксплуатационную интенсивность отказов РЭУ в целом определяют суммированием значений $\lambda_{\varepsilon i}$:

$$\Lambda_{\text{РЭУ}} = \Lambda_{\varepsilon 1} + \Lambda_{\varepsilon 2} + \dots + \Lambda_{\varepsilon N}.$$

Если в составе РЭУ имеются одинаковые модули, то для расчёта величины $\Lambda_{\text{РЭУ}}$ вместо указанного выражения может использоваться выражение

$$\Lambda_{\text{РЭУ}} = \sum_{i=1}^v \Lambda_{\varepsilon i} \cdot m_i,$$

где m_i – количество модулей i -го вида в составе РЭУ;

v – число разновидностей модулей.

В предположении экспоненциального закона распределения отказов найдены расчетные значения группы безотказных показателей РЭУ.

Практическое задание:

1. Изучить порядок выполнения расчета показателей безотказности исследуемого модуля.

2. Пользуясь принципиальными схемами и технической документацией, выяснить значение их электрических и эксплуатационных характеристик, необходимых для расчёта поправочных коэффициентов, используемых в математических моделях.

3. Ответьте на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы:

1. Перечислите исходные данные для расчета показателей надежности?

2. Как определить коэффициенты электрической нагрузки? Какая погрешность допускается при данных расчетах?

3. Как определить максимальную рабочую температуру элементов в РЭУ?

4. Как определить базовую и эксплуатационную интенсивность отказов элементов РЭУ?

5. Как определить эксплуатационную интенсивность отказов металлизированных отверстий платы и соединений пайкой?

6. Как подсчитать эксплуатационную интенсивность отказов исследуемого модуля РЭУ?

Лабораторная работа № 1

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Цель: рассчитать коэффициенты $K_{ис}$, учитывающего количество элементов в ИМС или бит по предложенной математической модели с учетом вида ИМС.

Ход работы

Коэффициенты математической модели интегральных микросхем могут быть рассчитаны с использованием различных методов, включая экспериментальные и аналитические подходы.

Один из способов – это использование статистических методов, таких как метод наименьших квадратов или метод анализа компонентов, для моделирования и анализа данных, полученных из испытаний микросхем. Статистические методы могут помочь определить влияние различных факторов на характеристики микросхемы и их взаимосвязь.

Другой подход – это использование физических моделей и математических уравнений, описывающих поведение интегральных микросхем на основе их структуры, материалов и процессов производства. Этот подход может потребовать детального анализа физических процессов, происходящих в микросхеме, и может включать в себя моделирование переноса заряда, тепловых процессов, электромагнитной совместимости и других аспектов работы микросхемы.

Зависящее от конкретной задачи и доступных данных, выбор метода и расчет коэффициентов математической модели интегральной микросхемы остается вопросом индивидуального исследования.

Для определения поправочного коэффициента $K_{ИС}$ с учетом количества элементов в ИМС или разрядов (для ИМС памяти) можно использовать математическую модель, полученную на основе табличных эксплуатационных данных [15]:

$$K_{ИС} = AN^S,$$

где A , S – постоянные коэффициенты модели (табл. 9);

N – количество элементов в ИМС или бит.

Таблица 9

Коэффициенты моделей для различных групп ИМС

Группа ИМС	A	S	B
1. Полупроводниковые цифровые (логические, арифметические, микропроцессоры, регистры сдвига и др.)	0,336	0,288	0,021
2. Оперативные запоминающие устройства (ОЗУ)	0,468	0,168	0,021
3. Постоянные запоминающие устройства (ПЗУ) и программируемые ПЗУ (ППЗУ)	0,963	0,128	0,021
4. Перепрограммируемые ПЗУ (РПЗУ)	1,113	0,128	0,021
5. Аналоговые ИМС	0,478	0,253	0,023
6. Гибридные интегральные ИМС	0,796	0,120	0,024

Значения коэффициента K_t могут быть рассчитаны по следующему выражению

$$K_t = \exp[B(t_{\text{окр}} - 25)],$$

где B – константа, зависящая от функционального назначения ИМС; $t_{\text{окр}}$ – температура среды, окружающей ИМС, °С.

Для ИМС, работа которых допускается в облегчённых электрических режимах, значения поправочного коэффициента K_p могут быть рассчитаны с помощью математической модели:

$$K_p = 0,045 \exp(3,1K_{\text{обл}}) \exp[B(t_{\text{окр}} - 25)],$$

где $K_{\text{обл}}$ – отношение рабочей электрической нагрузки к максимально допустимой (электрическая характеристика,

принимаемая во внимание, выбирается в зависимости от характера облегченности электрического режима ИМС).

Значение $t_{\text{окр}}$ может определяться по выражению

$$t_{\text{окр}} = t_{\text{раб max}} + \Delta t_3,$$

где $t_{\text{раб max}}$ – верхнее значение рабочей температуры РЭУ;

Δt_3 – перегрев в нагретой зоне конструкции РЭУ (обычно $\Delta t_3 \leq 25 \dots 30$ °С).

Значения поправочного коэффициента $K_{\text{корп}}$ в зависимости от типа корпуса ИМС приведены в таблице 10. Значения поправочного коэффициента K_V следует выбирать из таблицы 11.

Таблица 10

Значения коэффициента $K_{\text{корп}}$

Корпус	$K_{\text{корп}}$	Корпус	$K_{\text{корп}}$
Все корпуса, кроме пластмассовых (полимерных)	1,0	Пластмассовые (полимерные)	3,0

Таблица 11

Значения коэффициента K_V в зависимости от максимальных значений напряжения питания

Технология	Значение K_V для напряжения источника питания, В		
	до 10	> 10 до 12.6	> 12.6 до 15
КМОП	1,0	3,0	10,0
Прочие виды технологий	1,0		

Пример расчета поправочных коэффициентов математической модели для ИМС представлен на рисунке 5.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Интегральная микросхема	A	S	B	N	Kис	токр	Кобл	Кр	
2	D1	0,336	0,288	0,021	49	1,030661	110	0,183333333	0,473426	
3										
4	Корпус	Ккорп								
5	Пластмассовый	3								
6										
7	Технология	Kv								
8	КМОП	3								
9										
10	$\lambda_3 = \lambda_n K_p K_{ис} K_{корп} K_f K_3 K_{II}$									
11										
12	Интегральная микросхема	λб	Кр	Кис	Ккорп	Kv	Кэ	Кп		
13	D1	0,023	0,473426097	1,030661	3	3	1,2	5,5		
14	$K_p = 0,045 \exp(3,1 K_{обл}) \exp[B(t_{окр} - 25)],$									
15	$K_{ис} = AN^s$									
16										
17										
18										

Рис. 5. Расчет коэффициентов математической модели ИМС

Практическое задание

1. Изучить методику расчета коэффициентов математической модели интегральных микросхем.
2. Рассчитать коэффициенты $K_{ис}$, учитывающие количество элементов в ИМС или бит по предложенной математической модели с учетом вида ИМС с использованием табличного процессора EXCEL.
3. Подготовить отчет по лабораторной работе в электронном виде.

Лабораторная работа № 2

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ

ПРИБОРОВ (ППП)

Цель: провести расчет коэффициентов математической модели полупроводниковых приборов, входящих в исследуемый модуль РЭУ.

Ход работы

Надежность ППП, понимаемая как способность полупроводниковых элементов сохранять свои свойства в течение определенного периода времени, является одной из важнейших характеристик силовых модулей. Они отличаются от других электронных компонентов высокой тепловой и электрической нагрузкой, а их внезапный преждевременный выход из строя может иметь очень серьезные прямые и косвенные последствия как в техническом, так и в экономическом отношении.

Надежность полупроводниковых приборов обычно определяется их долговечностью и стабильной работой в течение продолжительного времени. Она зависит от качества материалов, производственных процессов, технических параметров и условий эксплуатации. Полупроводниковые приборы, такие как диоды, транзисторы и интегральные схемы, обычно имеют высокую надежность, особенно если производятся крупными и надежными компаниями. Тем не менее, надежность полупроводниковых приборов может быть подвержена внешним факторам, таким как перегрузки, перепады напряжения, температурные изменения,

вибрации и другие агрессивные условия эксплуатации. Надежность также может быть улучшена путем разработки специальных методов тестирования и контроля качества при производстве полупроводниковых приборов.

Из-за высоких ресурсных требований и сложных методов испытаний показатели надежности полупроводниковых элементов трудно точно оценить численно. Для его правильного проведения необходимы следующие факторы:

- высокий контроль всех производственных процессов;
- проведение испытаний в условиях, близких к рабочим, что позволяет выявлять типовые механизмы отказа;
- мониторинг наиболее важных физических параметров компонентов в составе системы.

С учетом вышесказанного значения поправочного коэффициента K_p могут быть рассчитаны с помощью математической модели:

$$K_p = A \exp \left[\frac{N_T}{273 + t_{\text{окр}} + \Delta t K_H} + \left(\frac{273 + t_{\text{окр}} + \Delta t K_H}{T_M} \right)^L \right],$$

где A , N_T , T_M , L , Δt – константы модели;

$t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды;

K_H – коэффициент электрической нагрузки (см. табл. 3).

Значения констант, входящих в модель, приведены в таблице 12.

Таблица 12

Константы модели для полупроводниковых приборов

Группа элементов	A	N_T	T_M	L	Δt
Диоды, кроме стабилитронов. Диодные сборки	44,1025	–2138	448	17,7	150
Стабилитроны	2,1935	–800	448	14,0	150
Транзисторы биполярные, кроме мощных СВЧ. Транзисторные сборки. Полевые транзисторы	5,2	–1162	448	13,8	150
Тиристоры	37,2727	–2050	448	9,6	150

Значения поправочного коэффициента K_F следует выбирать из таблицы 13.

Таблица 13

Влияние функционального режима работы на коэффициент K_Φ

Группа приборов	Функциональный режим работы	K_Φ
Диоды выпрямительные, универсальные, импульсные, столбы выпрямительные, варикапы подстроечные, диодные сборки	Линейный	1,0
	Переключающий	0,6
	Выпрямительный	1,5
Транзисторы биполярные, кроме мощных СВЧ. Транзисторные сборки	Линейный	1,5
	Переключающий	0,7
	Генераторный	0,7
	Высоковольтные приборы	1,5
Транзисторы полевые	Кремниевые приборы:	
	линейный	1,5
	переключающий	0,7
	генераторный	1,0
	СВЧ-диапазона	5,0
	Арсенидогаллиевые приборы	7,5

При выборе коэффициента K_d следует руководствоваться таблицей 14.

Таблица 14

Значения коэффициента K_d

Группа приборов	Нагрузка	Значение нагрузки	K_d
Диоды, диодные сборки	Максимально допустимый по ТУ средний прямой ток $I_{пр.ср \max \text{ ТУ, А}}$	≤ 1	0,6
		$> 1 \leq 3$	0,8
		$> 3 \leq 10$	1,0
		$> 10 \leq 20$	2,0
Транзисторы биполярные, кроме мощных СВЧ. Транзисторные сборки. Варикапы подстроечные	Максимально допустимая по ТУ рассеиваемая мощность $P_{\max \text{ ТУ, Вт}}$	≤ 1	0,5
		$> 1 \leq 5$	0,8
		$> 5 \leq 20$	1,0
		$> 20 \leq 50$	1,3
		$> 50 \leq 200$	2,5
Тиристоры	Максимально допустимый по ТУ средний прямой ток $I_{пр.ср \max \text{ ТУ, А}}$	≤ 1	1,0
		$> 1 \leq 5$	3,0
		$> 5 \leq 25$	6,0
		$> 25 \leq 50$	10,0

Значения коэффициента K_U приведены в таблице 15.

Таблица 15

Значения коэффициента K_U

Группа приборов	Коэффициент нагрузки по напряжению $K_H^{(U)}$	Значение или модель расчёта K_U
Диоды, варикапы подстроечные, диодные сборки ¹	От 0 до 0,6	0,7
	$> 0,6 \text{ до } 1,0$	$K_U = 1/[2,11 - 1,11K_H^{(U)}]$
Транзисторы биполярные, кроме мощных СВЧ. Транзисторные сборки.	От 0 до 0,5	0,5
	$> 0,5 \text{ до } 1,0$	$K_U = 1/[2,42 - 2,09K_H^{(U)}]$

Примечание. Используется коэффициент нагрузки по обратному напряжению.

Пример расчета показателей надежности полупроводниковых приборов представлен на рисунке 6.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Полупроводниковые	A	Nt	Tm	L	Δt	Kn	Kp	
2	VT1,VT2	5,2	-1162	448	13,8	150	0,78125	0,449318422	
3	VT3	5,2	-1162	448	13,8	150	0,375	0,203446738	
4	VD1,VD2	44,1025	-2138	448	17,7	150	0,5	0,148623857	
5									
6									
7									
8									
9	Транзисторы	λб	Kp	Kф	Kл	Kи	Kэ	Kп	
10	VT1,VT2	0,000000044	0,449318	0,7	0,6	1,270345	1,2	8	
11	VT3	0,000000044	0,203447	0,7	0,6	0,5	1,2	8	
12									
13	Диоды	λб	Kp	Kл	Kэ	Kп			
14	VD1,VD2	0,000000162	0,148624	0,6	1,2	8			
15									
16	Транзисторы	$\lambda_3 = \lambda_b K_p K_\phi K_\lambda K_\varepsilon K_\pi$							
17	Диоды	$\lambda_3 = \lambda_b K_p K_\lambda K_\varepsilon K_\pi$							
18									

Рис. 6. Расчет коэффициентов математической модели ППП

Практическое задание

1. Изучить методику расчета коэффициентов математической модели полупроводниковых приборов.
2. Провести расчет коэффициентов математической модели полупроводниковых приборов, входящих в исследуемый модуль РЭУ с использованием табличного процессора EXCEL.
3. Подготовить отчет по лабораторной работе в электронном виде.

Лабораторная работа № 3

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Цель: провести расчет коэффициентов математической модели излучающих диодов, оптопар транзисторных, тиристорных, диодных и резисторных, входящих в исследуемый модуль РЭУ.

Ход работы

Оптоэлектроника — научно-техническая область, изучающая применение эффектов взаимодействия оптического излучения (света) с веществом (обычно твердым телом). Его преимущества заключаются в огромной информационной емкости оптических каналов связи, связанной с высокой частотой электромагнитных колебаний ($\sim 10^{15}$ Гц) света. Еще одним преимуществом является высокая плотность энергии оптического излучения внутри светодиода, что позволяет минимизировать поперечные размеры оптоволокон.

Оптоэлектронное устройство — элемент или узел, используемый в оптоэлектронике для преобразования оптического излучения в электрические сигналы и наоборот. Оптоэлектронные устройства делятся на источники оптического излучения и приемники оптического излучения (фотоприемники). Кроме них, к оптоэлектронным устройствам относятся оптические волноводы, оптическая память, функциональные устройства (преобразователи некогерентного излучения в когерентное, оптопары, оптические вентили и др.), оптические и оптоэлектронные интегральные

схемы, модуляторы света и отклоняющие системы, а также различные типы дисплеев.

Надежность оптоэлектронных элементов определяется их способностью сохранять свои характеристики и работать стабильно в течение продолжительного времени при различных условиях эксплуатации. Оптоэлектронные элементы, такие как светодиоды, фотодиоды, оптопары и оптроны, обычно имеют высокую надежность благодаря использованию полупроводниковых материалов, которые обладают стабильностью физических и электрических характеристик.

Надежность оптоэлектронных элементов может быть повышена за счет строгого контроля производственных процессов, использования качественных материалов, проведения надежных и точных испытаний, а также разработки специальных методов защиты от воздействия внешних факторов, таких как влага, температурные изменения, вибрации и электромагнитные помехи.

Кроме того, надежность оптоэлектронных элементов в значительной степени зависит от условий эксплуатации и ограничений, установленных производителем. Это включает в себя правильное применение и монтаж, обеспечение стабильного питания и температурного режима, а также предотвращение механических повреждений.

Для определения показателей надежности оптоэлектронных элементов рассчитаем значения коэффициента режима работы K_p для излучающих диодов, оптопар транзисторных, тиристорных, диодных и резисторных с помощью математической модели:

$$K_p = \left(\frac{I_{\text{пр.ср}}}{I_{\text{пр.ср}0}} \right)^m \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{t_{\text{н0}} + 273} - \frac{1}{t_{\text{н}} + 273} \right) \right],$$

где $I_{\text{пр.ср}}$, $I_{\text{пр.ср}0}$ – средний прямой ток излучателя соответственно в рабочем и номинальном режимах;

E_a – энергия активации процессов деградации ($E_a = 0,6$ эВ);

k – постоянная Больцмана ($k = 8,625 \cdot 10^{-5}$ эВ/К);

m – показатель степени, зависящий от свойств кристалла и принимающий значения от 1 до 2;

$t_{п}$, $t_{п0}$ – температура p – n -перехода соответственно в рабочем и номинальном режимах, °C.

При работе элемента в импульсном режиме $m = 2$. Для других режимов в зависимости от типа излучающего материала величина m равна: 1,4 – для $GaAs$; 1,2 – для GaP ; 1,5 – для $GaAlAs$, $GaAsP$.

Температура p – n -перехода определяется по формуле

$$t_{п} = P_{\text{раб}} R_{т} + t_{\text{окр}}; \quad t_{п0} = P_{\text{max}} R_{т} + 25 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

где $P_{\text{раб}}$ – рассеиваемая мощность в рабочем режиме при температуре $t_{\text{окр}}$, Вт;

$R_{т}$ – тепловое сопротивление, °C/Вт;

P_{max} – максимальная рассеиваемая мощность при температуре +25 °C, Вт;

$t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °C.

При отсутствии значений $R_{т}$ температура p – n -перехода примерно может быть определена как

$$t_{п} \approx t_{\text{раб max}} + \frac{I_{\text{пр.сп}}}{I_{\text{пр.сп } 0}} 20, \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad t_{п0} = t_{\text{ном}} + 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = 25 + 20 = 45 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

где $t_{\text{раб max}}$ – максимальная рабочая температура РЭУ, °C.

Значение коэффициента $K_{р}$ для оптоэлектронных микросхем может быть принято равным единице [10].

Пример расчета показателей надежности оптоэлектронных элементов представлен на рисунке 7.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Группа светодиодов	$\ln p_{\text{сп}}$	$\ln p_{\text{сп } 0}$	E_{a}	k	m	$t_{\text{п}}$	$t_{\text{п } 0}$	$K_{\text{п}}$	$K_{\text{р}}$	K_{λ}	$K_{\text{п}}$	$\lambda_{\text{д}}$
2	LED	0,01	0,025	0,6	0,00008625	1,15	40	85	0,4	0,409829	1,1	5,5	0,000000185
3													
4													
5	$K_{\text{р}} = \left(\frac{I_{\text{пр.сп}}}{I_{\text{пр.сп } 0}} \right)^m \exp \left[\frac{E_{\text{a}}}{k} \left(\frac{1}{t_{\text{п } 0} + 273} - \frac{1}{t_{\text{п}} + 273} \right) \right],$												
6													
7													
8													
9	$\lambda_{\lambda} = \lambda_{\text{в}} K_{\text{р}} K_{\lambda} K_{\text{п}}$												
10													
11	Группа элементов									$\lambda_{\text{д}}, \times 10^{-6} \text{ 1/ч}$			
12	Оптоэлектронные полупроводниковые приборы												
13	Фотодиоды на основе кремния									0,185			
14													

Рис. 7. Расчет коэффициентов математической модели оптоэлектронных элементов

Практическое задание:

1. Изучить методику расчета коэффициентов математической модели оптоэлектронных элементов.
2. Провести расчет коэффициентов математической модели излучающих диодов, оптопар транзисторных, тиристорных, диодных и резисторных, входящих в исследуемый модуль РЭУ с использованием табличного процессора EXCEL.
3. Подготовить отчет по лабораторной работе в электронном виде.

Лабораторная работа № 4

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

КОНДЕНСАТОРОВ

Цель: провести расчет коэффициентов математической модели конденсаторов, входящих в исследуемый модуль РЭУ.

Ход работы

Надежность конденсаторов зависит от нескольких факторов, включая качество материалов и изготовления, условия эксплуатации, температурные изменения, напряжение и ток, возможные внешние воздействия (вибрации, удары, влажность) и срок службы. Кроме того, возможность деградации конденсаторов также может быть связана с их возрастом. Более дорогие и качественные конденсаторы обычно будут более надежными и имеют более длительный срок службы, тогда как более дешевые модели могут иметь более высокий уровень отказов.

В процессе эксплуатации конденсатор под воздействием электрических и тепловых полей существенно ухудшает свои свойства из-за необратимых изменений молекулярной структуры и состава образующих его материалов. В этом и состоит физическая суть его старения, которое увеличивается со временем эксплуатации и приводит к выходу из строя, т. е. к прекращению функций конденсатора.

Конденсатор сохраняет работоспособность до тех пор, пока его электрическая прочность не упадет до уровня, при котором происходит пробой. Старение диэлектрика имеет три формы:

ионизационную, при которой он разрушается возникающими в нем ЧР; термический, при котором разрушение материала происходит преимущественно за счет процессов окисления и определяется температурой диэлектрика; электрохимический, при котором старение носит преимущественно электрохимический характер. Как правило, все три формы старения взаимосвязаны.

Значения поправочного коэффициента конденсаторов K_p могут быть рассчитаны с помощью математической модели:

$$K_p = A \left[\left(\frac{K_H}{N_s} \right)^H + 1 \right] \exp \left[B \left(\frac{t_{\text{окр}} + 273}{N_T} \right)^G \right],$$

где $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды (корпуса элемента), °C;

K_H – коэффициент электрической нагрузки конденсатора по напряжению;

A, B, N_T, G, N_s, H – постоянные коэффициенты (табл. 16).

Таблица 16

Постоянные коэффициенты модели

Группа конденсаторов	A	B	N_T	G	N_s	H
Керамические, стеклокерамические, подстроечные с твёрдым диэлектриком	$5,909 \cdot 10^{-7}$	14,3	398	1	0,3	3
Слюдяные	$9,885 \cdot 10^{-8}$	16	358	1	0,4	3
С органическим синтетическим диэлектриком	$9,259 \cdot 10^{-3}$	2,5	358	18	0,4	5
Бумажные и металлобумажные	$9,583 \cdot 10^{-3}$	2,5	358	18	0,4	5
Оксидно-электролитические алюминевые	$3,59 \cdot 10^{-2}$	4,09	358	5,9	0,55	3

Значения коэффициента K_C могут быть подсчитаны по математическим моделям, приведённым в таблице 17.

Таблица 17

Модели для подсчёта коэффициента K_C

Группа конденсаторов	Модель	Примечание
Тонкоплёночные с неорганическим диэлектриком	$K_C = 1$	–
Керамические и стеклокерамические	$K_C = 0,4C^{0,12}$	C в пФ
Слюдяные	$K_C = 0,4C^{0,14}$	C в пФ
Бумажные и металлобумажные	$K_C = C^{0,05}$	C в мкФ
С органическим синтетическим диэлектриком	$K_C = C^{0,05}$	C в мкФ
Оксидно-электролитические алюминевые	$K_C = 0,2C^{0,23}$	C в мкФ

Пример расчета показателей надежности конденсаторов представлен на рисунке 8.

1	Конденсатор	A	B	Nt	G	Ns	H	Kн	Kр
2	C1,C7	5,909E-07	14,3	398	1	0,3	3	0,24	0,02639
3	C2	5,909E-07	14,3	398	1	0,3	3	0,24	0,02639
4	C3,C6	5,909E-07	14,3	398	1	0,3	3	0,75	0,02639
5	C4	0,0359	4,09	358	5,9	0,55	3	0,0267	0,14352
6	C5	5,909E-07	14,3	398	1	0,3	3	0,12	0,02639
7									
8				$K_p = A \left(\left(\frac{K_H}{N_s} \right)^H + 1 \right) \exp \left(B \left(\frac{t_{exp} + 273}{N_T} \right)^G \right)$					
9	$\lambda_3 = \lambda_B K_p K_c K_3 K_{II}$								
10									
11	Конденсатор	λ_6	Kp	Kc	Kз	Kп			
12	C1,C7	0,173	0,0264	0,022	1,1	5			
13	C2	0,173	0,0264	1000	1,1	5			
14	C3,C6	0,173	0,0264	0,33	1,1	5			
15	C4	0,173	0,1435	100	1,1	5			
16	C5	0,173	0,0264	0,1	1,1	5			

Рис. 8. Расчет коэффициентов математической модели конденсаторов

Практическое задание

1. Изучить методику расчета коэффициентов математической модели конденсаторов.
2. Провести расчет коэффициентов математической модели конденсаторов, входящих в исследуемый модуль РЭУ с использованием табличного процессора EXCEL.
3. Подготовить отчет по лабораторной работе в электронном виде.

Лабораторная работа № 5

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

РЕЗИСТОРОВ

Цель: провести расчет коэффициентов математической модели резисторов, входящих в исследуемый модуль РЭУ.

Ход работы

Под надежностью резисторов понимают их способность сохранять свои характеристики (проводимость, контактирование, плавное регулирование) и параметры (сопротивление, уровень шума и т.п.) в пределах установленных норм при определенных условиях эксплуатации (или испытаний) в течение заданного времени.

Надежность резисторов также зависит от нескольких факторов, включая качество материалов и производства, условия эксплуатации, температурные изменения, напряжение и ток, а также внешние воздействия. Как и в случае с конденсаторами, более высококачественные резисторы обычно будут более надежными и имеют более длительный срок службы, чем низкокачественные. Производители резисторов также проводят тестирования на надежность, чтобы обеспечить их долговечность и стабильную работу. В целом, хорошее качество резисторов и их правильное применение в схеме позволит достичь высокой надежности электронного оборудования.

Выход из строя резистора означает как полное нарушение его работоспособности, так и ухудшение основных параметров сверх

установленных норм. В соответствии с этим отказы классифицируются на полные и условные (параметрические).

Полный выход из строя возникает в результате нарушения электрической или механической прочности резистора и характеризуется значительным резким изменением его основных параметров. В частности, критериями полного выхода из строя являются перегорание (обрыв) токопроводящего элемента, поломка базы и выводов, потеря контакта между средней клеммой и токопроводящим элементом.

Условный отказ резистора может проявляться в виде выхода одного из параметров (чаще всего сопротивления) за пределы норм, установленных в качестве критериев годности.

Поскольку степень допустимых изменений параметров резисторов, приводящих к неисправности электронной аппаратуры, различна и зависит от требований, предъявляемых к конкретной электронной схеме, условные отказы не имеют единых числовых критериев. Действительно, изменение сопротивления резистора в прецизионном оборудовании, например, на $\pm 2\%$ может привести к выходу из строя, но практически не окажет влияния на работу цепей, где резисторы используются в качестве демпфирующих элементов.

Значения поправочного коэффициента резистора K_p рассчитывают по модели

$$K_p = A \exp \left[B \left(\frac{t_{\text{окр}} + 273}{N_T} \right)^G \right] \exp \left\{ \left[\left(\frac{K_H}{N_S} \right) \left(\frac{t_{\text{окр}} + 273}{273} \right)^J \right]^H \right\},$$

где K_H – коэффициент электрической нагрузки резистора по мощности;

$t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды (корпуса элемента), °C;

A, B, N_T, G, N_S, J, H – постоянные коэффициенты (табл. 18).

Таблица 18

Постоянные коэффициенты модели

Группа резисторов	A	B	N_T	G	N_S	J	H
Резисторы постоянные:							
металлодиэлектрические, металлизированные	0,260	0,5078	343	9,278	0,878	1	0,886
композиционные плёночные	0,06	1,616	328	2,746	0,622	1,198	0,770
композиционные объёмные	0,093	2,194	358	2,019	1,245	1,2	1,362
Резисторы переменные:							
непроволочные керметные	0,399	1,5419	343	9,8965	3,1668	1,3071	0,6012
композиционные объёмные, потенциометры	0,655	0,693	373	7,223	2,895	1	1,335
проволочные	0,202	1,14	343	21,7	0,529	1	0,599

Значения коэффициентов K_M , K_R и K_U выбирают из таблиц 19–21.

Таблица 19

Значения коэффициента K_M для металлодиэлектрических резисторов

Мощность, Вт	K_M	Мощность, Вт	K_M	Мощность, Вт	K_M
0,062–0,5	0,7	1–2	1,5	5–10	4,5

Таблица 20

Значения коэффициента K_R

Диапазон сопротивлений	K_R	Диапазон сопротивлений	K_R	Диапазон сопротивлений	K_R
Резисторы постоянные неспроложные: металлодиэлектрические					
< 1 кОм	1,0	≥ 1 кОм < 100 кОм	0,7	≥ 100 кОм < 1 МОм	2,0
углеродистые					
≤ 100 кОм	0,5	> 100 кОм ≤ 1 МОм	2,7	> 1 МОм	0,7
Резисторы переменные: неспроложные керметные					
> 10 Ом ≤ 100 Ом	1,6	> 100 Ом ≤ 330 Ом	1,4	> 330 Ом	1,0
проволочные					
≤ 1 кОм	1,9	> 1 кОм ≤ 10 кОм	0,5	> 10 кОм ≤ 100 кОм	0,9

Значения коэффициента K_U для переменных непервоначальных резисторов

$U_{раб} / U_{ту}$	K_U	$U_{раб} / U_{ту}$	K_U	$U_{раб} / U_{ту}$	K_U
$\geq 0,1 \leq 0,8$	1,0	$> 0,8 \leq 0,9$	1,05	$> 0,9 \leq 1,0$	1,2

Значения коэффициента K_Δ в зависимости от допуска на сопротивление резистора: 2 – при допуске $\pm 0,5\%$, 1 – при допуске $\pm 1, \pm 2, \pm 5, \pm 10\%$ и более.

Пример расчета показателей надежности резисторов представлен на рисунке 9.

1	Резисторы	A	B	Nt	G	Ns	J	H	Kп	Kр
2	R1,R3	0,26	0,5078	343	9,278	0,878	1	0,886	0,42553	0,52704
3	R2	0,655	0,693	373	7,223	2,895	1	1,335	0,19608	0,7747
4	R4	0,26	0,5078	343	9,278	0,878	1	0,886	0,60606	0,64976
5	R5	0,26	0,5078	343	9,278	0,878	1	0,886	0,41667	0,52153
6	R6	0,26	0,5078	343	9,278	0,878	1	0,886	0,18939	0,39389
7	R7	0,26	0,5078	343	9,278	0,878	1	0,886	0,61275	0,65472
8	R8	0,26	0,5078	343	9,278	0,878	1	0,886	0,34722	0,47985
9										
10										
11	$\lambda_3 = \lambda_E K_P K_R K_J K_{II} \quad K_P = A \exp \left(B \left(\frac{t+273}{N_T} \right)^G \right) \exp \left(\left(\frac{K_H}{N_S} \right) \left(\frac{t+273}{273} \right)^H \right)$									
12										
13										
14	Резисторы	λ_6	Kр	KR	Kз	Kп				
15	R1,R3	0,000000044	0,52704	2,7	1,2	3				
16	R2	0,000000179	0,7747	0,5	1,5	3				
17	R4	0,000000044	0,64976	0,5	1,2	3				
18	R5	0,000000044	0,52153	0,5	1,2	3				
19	R6	0,000000044	0,39389	0,5	1,2	3				
20	R7	0,000000044	0,65472	2,7	1,2	3				
21	R8	0,000000044	0,47985	0,5	1,2	3				

Рис. 9. Расчет коэффициентов математической модели резисторов

Практическое задание

1. Изучить методику расчета коэффициентов математической модели резисторов.
2. Провести расчет коэффициентов математической модели резисторов, входящих в исследуемый модуль РЭУ с использованием табличного процессора EXCEL.
3. Подготовить отчет по лабораторной работе в электронном виде.

Лабораторная работа № 6

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

ЭЛЕМЕНТОВ КОММУТАЦИИ

И СОЕДИНИТЕЛЕЙ (РАЗЪЕМОВ)

Цель: провести расчет коэффициентов математической модели элементов коммутации и соединителей (разъемов), входящих в исследуемый модуль РЭУ.

Ход работы

Коммутационные элементы предназначены для включения, выключения и переключения электрических цепей. Переключение обычно означает выполнение этих трех операций. Имеются переключающие элементы ручного и автоматического управления. Коммутационные элементы ручного управления активируются прямым механическим воздействием на их органы управления.

Элементы автоматического переключения срабатывают под действием электромагнитных сил на их приводные элементы. Основной частью таких элементов обычно является электромагнит; входным сигналом для них является электрический ток или напряжение. Элементы автоматического переключения используются в системах автоматизации и для дистанционного управления различными механизмами и устройствами.

Коммутационные элементы различают по количеству коммутируемых цепей (одноцепные и многоцепные) и количеству фиксированных положений, а также переключающие элементы с самовозвратом в исходное положение, то есть без фиксации

коммутируемого положения, что может быть необходимо для ряда цепей управления.

Все коммутационные элементы, используемые в цепях управления, должны иметь следующие компоненты: неподвижные контакты, подвижные контакты и элемент управления. Кроме того, они могут иметь элементы крепления, монтажа и регулировки, гашения дуги и т. д. Необходимые коммутационные элементы подбираются по допустимым значениям тока и напряжения. Но наиболее важной для практики характеристикой коммутационных элементов является их надежность, т. е. сохранение работоспособности при большом количестве операций.

К переключающим элементам с механическим приводом относятся кнопки управления, микропереключатели, тумблеры, ключевые, поворотные, рычажные и кулачковые переключатели, а также концевые и концевые выключатели.

Элементы коммутации

Значения K_p рассчитывают по модели

$$K_p = 7 \left(\frac{t + 273}{398} \right)^{12} \exp(1,25 K_H)^2,$$

где t – рабочая температура, °C ($25 \leq t \leq t_{\max}$);

$t_{\max}$ – максимально допустимая по ТУ температура окружающей среды;

K_H – коэффициент электрической нагрузки по току.

Значения коэффициента K_K выбирают из таблицы 22.

Таблица 22

Значения коэффициента K_K для коммутационных изделий

Группа изделий	Количество задействованных контактов N	K_K	Группа изделий	Количество задействованных контактов N	K_K
Тумблеры	Однополюсные	0,5	Переключатели кнопочные, подвижные	1	0,25
	Двухполюсные	1,0		2	1,0
	Трёхполюсные	1,5		≥ 3	2,0
	Четырёхполюсные	2,0	Переключатели галетные	–	1

Значения коэффициента K_F в зависимости от частоты включений в час:

$$K_F = 0,5 \text{ при } F < 100; K_F = 0,5 + 0,25 \lg F \text{ при } F \geq 100,$$

где F – частота коммутаций изделия в РЭУ, включений в час.

Соединители (разъёмы)

Значения K_p определяют по модели

$$K_p = \exp \left[9000 \left(\frac{1}{298 + t_n} - \frac{1}{273 + t_{\text{окр}} + t_n \exp [-1,8(1 - K_H)]} \right) \right],$$

где t_n – температура перегрева контактов по ТУ при максимальной токовой нагрузке, по ТУ $t_n = 10 \dots 30$ °C;

$t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °C;

K_H – коэффициент электрической нагрузки по току.

Значения коэффициента, учитывающего влияние на надёжность соединителя количества задействованных контактов N , могут быть рассчитаны как

$$K_K = \exp \left\{ \left[0,1(N-1) \right]^{0,51064} \right\}.$$

Значения коэффициента, учитывающего влияние на надёжность соединителя количества сочленений–расчленений n , рассчитываются по модели

$$K_n = 0,32 \exp(0,0028n).$$

Значения коэффициента K_t для радиочастотных соединителей могут быть получены по выражению

$$K_t = \exp [0,023(t_{\text{раб}} - 25)],$$

где $t_{\text{раб}}$ – рабочая температура радиочастотного соединителя, °C.

Температуру $t_{\text{раб}}$ определяют как [11, 12]

$$t_{\text{раб}} = t_{\text{окр}} + 5, \text{ °C},$$

где $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °C.

Пример расчета в показателей надежности ИМС представлен на рисунке 10.

1	Соединения пайкой волной	λ_6	K_t	$K_э$	$K_{п}$	$t_{окр}$
2	Соединения пайкой волной	6,9E-11	1	1	5	25
3						
4	$K_t = 0,061 t_{окр} - 0,525$					
5						
6	$\lambda_э = \lambda_6 K_t K_э K_{п}$					

Рис. 10. Расчет коэффициентов математической модели элементов коммутации и соединителей (разъемов)

Практическое задание:

1. Изучить методику расчета коэффициентов математической модели элементов коммутации и соединителей (разъемов).
2. Провести расчет коэффициентов математической модели элементов коммутации и соединителей (разъемов), входящих в исследуемый модуль РЭУ с использованием табличного процессора EXCEL.
3. Подготовить отчет по лабораторной работе в электронном виде.

Лабораторная работа № 7

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

ТРАНСФОРМАТОРОВ

Цель: провести расчет коэффициентов математической модели трансформаторов, входящих в исследуемый модуль РЭУ.

Ход работы

Силовые трансформаторы являются дорогостоящим оборудованием и одним из важнейших звеньев наряду с другим оборудованием в электроснабжении предприятий. Сохранение и продление срока службы этого дорогостоящего оборудования является важной экономической задачей.

Проблема эксплуатационной надежности силовых трансформаторов в электрических сетях является предметом исследований ученых. В реальных условиях каждый уровень системы электроснабжения может являться границей защиты производства от отказов.

Расчетный срок службы трансформатора – 25 лет, но надежность достигается только при соблюдении всех норм правильной организации работы, определенных правилами устройства электроустановок, правилами технической эксплуатации и инструкциями завода-изготовителя.

Исследования показали, что в среднем на трансформаторы мощностью до 1800 кВА приходится 60–70 % от общего количества повреждений. Основными причинами отказов трансформаторов являются пробой изоляции витков, повреждение

изоляции витков, возникающее во время грозы, и быстрое окисление масла.

Значения поправочного коэффициента трансформатора K_p рассчитывают по модели

$$K_p = A \exp \left[\left(\frac{t_M + 273}{T_M} \right)^G \right],$$

где t_M – температура максимально нагретой точки обмотки трансформатора, характеризуется классом изоляции;

A, G, T_M – постоянные модели (табл. 23).

Таблица 23

Значения постоянных модели

Максимально допустимая температура по ТУ $t_{\max}$, °С (класс изоляции)	A	G	T_M	Максимально допустимая температура по ТУ $t_{\max}$, °С (класс изоляции)	A	G	T_M
70...85 (А)	0,81	15,6	329	95...105 (В)	0,891	14	352

Температуру t_M определяют как

$$t_M = t_{\text{окр}} + t_{\text{п}},$$

где $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С;

$t_{\text{п}}$ – температура перегрева, °С.

Значения $t_{\text{п}}$ для частоты питающей сети $f = 50$ Гц рассчитывают по формуле

$$t_{\text{п}} = 0,25 t_{\text{п.ТУ}} (3 K_{\text{н}}^2 + 1),$$

для $f > 50$ Гц:

$$t_{\text{п}} = 0,5 t_{\text{п.ТУ}} (K_{\text{н}}^2 + 1),$$

где $t_{\text{п.ТУ}}$ – максимальная температура перегрева по ТУ, °С;

$K_{\text{н}}$ – коэффициент электрической нагрузки трансформатора по мощности.

Для трансформаторов питания РЭС: $t_{\max} = 85$ °С; $t_{\text{п.ТУ}} \approx 55$ °С.

Практическое задание:

1. Изучить методику расчета коэффициентов математической модели трансформаторов.
2. провести расчет коэффициентов математической модели трансформаторов, входящих в исследуемый модуль РЭУ с использованием табличного процессора EXCEL.
3. Подготовить отчет по лабораторной работе в электронном виде.

Лабораторная работа № 8

ВЫБОР ЗНАЧЕНИЯ

КОЭФФИЦИЕНТОВ $K_э$ И $K_п$

Цель: провести выбор значения коэффициентов $K_э$ и $K_п$ элементов каждой группы в зависимости от условий эксплуатации и приёмки, входящих в исследуемый модуль РЭУ

Ход работы

Значения коэффициента $K_э$

В таблице 24 представлена классификация групп наземного оборудования в зависимости от условий эксплуатации, составленная с учетом справочников и стандартов надежности России, США и Китая [10–13, 15].

Также указано примерное соответствие выбранных групп российскому военному стандарту и руководству по надежности США. Для сравнения наземного оборудования с оборудованием других категорий в таблице 24 приводится (две последние строки) описание условий эксплуатации, а затем указываются значения $K_э$ для бортового, в частности авиационного, оборудования.

Таблица 24

Классификация аппаратуры по условиям её эксплуатации

Условное обозначение группы аппаратуры	Характеристика аппаратуры и условий её эксплуатации	Примерное соответствие группе по документам других стран	
		ГОСТ РВ 20.39.304-98 (Россия)	MIL-HDBK-217F (США)
З	Наземная (эксплуатируемая на земле) аппаратура, общее обозначение	1	G
З _р	Стационарная аппаратура, эксплуатируемая в лабораторных условиях, капитальных жилых помещениях, помещениях с искусственно регулируемым климатическими условиями	1.1	G_B
З _{чр}	Стационарная аппаратура, эксплуатируемая в нерегулярно отапливаемых помещениях (объёмах), в производственных, в том числе вентилируемых подземных помещениях (шахтах); возможно частичное регулирование климатических условий	1.1	G_B, G_{MS}
З _{пн}	Переносная аппаратура, эксплуатируемая в режиме стационарного применения в любых помещениях или под навесом (в условиях эксплуатации аппаратуры групп З _р , З _{чр} и З _{ов})	1.10	G_F
З _м	Мобильная аппаратура (носимая, подвижная), эксплуатируемая в любых помещениях, в том числе в кузовах и прицепах автомобилей, палатках или на открытом воздухе	1.3–1.9	G_M
З _{мд}	Мобильная аппаратура, эксплуатируемая на железнодорожном транспорте, в кузовах и салонах автомашин и других механических транспортных средств	1.3–1.9	G_M
Б	Аппаратура самолётов и вертолётов, эксплуатируемая в воздушном пространстве (бортовая аппаратура), общее обозначение	3	A
Б _{ск}	Аппаратура грузовых и пассажирских самолётов, эксплуатируемая в отсеках (салонах, кабинах), где находятся люди	3.2	A_{IC}

В таблице 24 приводятся приближённые (усреднённые) значения коэффициента K_{Σ} , для групп аппаратуры, указанных в таблице 23. Усреднение значений K_{Σ} сделано по данным справочников России [11, 12] с учётом стандарта Китая [15].

Таблица 25

Значения коэффициента K_{Σ}

Класс (группа элементов)	Группа аппаратуры в зависимости от условий эксплуатации						
	Зр	Зчр	Зов	Зпн	Зм	Змд	Бск
1. ИМС	1	1,2	1,5	1,7	2	3	3,5
2. ППП, включая оптоэлектронные:							
диоды, кроме диодов СВЧ	1	1,2	1,5	2	3	4	4
стабилитроны, ограничители напряжения	1	1,2	1,7	2,5	4	5	5
диоды СВЧ	1	1,2	1,3	1,5	2	2	3
транзисторы биполярные, кроме СВЧ	1	1,2	1,5	2	4	5	4
транзисторы биполярные СВЧ	1	1,2	2	2,5	4	5	5
транзисторы полевые, тиристоры	1	1,2	1,3	1,5	1,7	2	3
излучатели полупроводниковые (светодиоды), оптопары	1	1,1	1,3	1,5	2	2,5	6
фотодиоды, фоторезисторы, фототранзисторы	1	1,1	1,5	2	3	4	6
3. Знакосинтезирующие индикаторы (вакуумные люминесцентные, вакуумные накаливаемые, газоразрядные, полупроводниковые)	1	1,1	1,3	1,5	2	2,5	6
4. Пьезоэлектрические приборы, электромеханические фильтры	1	1,1	1,3	1,5	1,7	2	2
5. Резисторы:							
постоянные непроволочные	1	1,2	1,5	2	3	5	6
постоянные проволочные и фольговые	1	1,2	1,5	2	3	5	10
переменные непроволочные	1	1,5	2	2,5	4	6	8
переменные проволочные	1	1,5	2	2,5	4	5	5
резисторные микросхемы, сборки	1	1,2	1,5	2	3	5	6
терморезисторы	1	1,2	1,5	2	3	5	6
6. Конденсаторы:							
керамические, стеклянные, слюдяные, тонкоплёночные с неорганическим диэлектриком	1	1,1	1,3	1,5	3	5	4
с органическим диэлектриком, бумажные	1	1,2	1,3	1,5	3	5	4
оксидно-электролитические	1	1,2	1,5	2	3	5	5
оксидно-пористые	1	1,2	1,5	2	3	5	5
подстроечные	1	1,5	2	2,5	4	6	5
7. Трансформаторы	1	1,3	1,6	2	3	5	10
8. Дроссели, катушки индуктивности	1	1,3	1,6	2	3	5	10
9. Линии задержки	1	1,2	2	3	3	5	10
10. Коммутационные изделия:							
тумблеры, кнопки; переключатели кнопочные, галетные, программные и движковые, переключатели на базе герконов	1	1,5	2	2,5	2,7	3	5
микрпереключатели	1	1,7	2,5	3	4	5	10
контакты магнитоуправляемые	1	1,7	2,5	5	10	16	50

Класс (группа элементов)	Группа аппаратуры в зависимости от условий эксплуатации						
	З _Р	З _{ЧР}	З _{ОВ}	З _{ПН}	З _М	З _{МД}	БСК
11. Соединители низкочастотные	1	1,2	1,3	1,5	2	3	3
12. Соединители радиочастотные	1	1,2	1,3	1,5	2	3	3
13. Реле:							
электромагнитные средней мощности и слаботочные	1	1,5	2,5	4	5	6	8
реле и автоматы защиты, выключатели и переключатели автоматические и т.п.	1	1,1	1,3	1,5	1,7	2	4
14. Электрические кабели, шнуры, провода	1	1	1,2	1,5	2	3	7
15. Соединения (пайка, сварка, скрутка и т.д.)	1	1,2	1,7	2	3	4	5
16. Пайки на платах с металлизированными отверстиями	1	1,2	1,7	2	3	4	5
17. Установочные изделия (предохранители, держатели предохранителей)	1	1,2	1,7	2	4	8	9
18. Прочие элементы:							
электронно-лучевые трубки	1	1	1,3	1,5	1,7	2	4
индикаторные лампочки	1	1,2	2	3	3,5	4,5	6

Таблица 26.

Значения коэффициента $K_{П}$

Класс (группа) элементов	Значения $K_{П}$ для видов приёмки:						
	неизвестный вид приёмки (уровень качества)	ОТК			«5» (ВП, ОВП)	«7» (ОСМ)	«9» (ОС)
		«1»		«3»			
		пластмассовые корпуса (только для ППП)	—				
1. ИМС	10	—	5,5	3,1	1	0,5	0,3
2. ППП, включая оптоэлектронные:							
диоды НЧ (общего назначения, переключаемые, выпрямительные, стабилитроны и др.)	10	8	5,5	2,4	1	0,7	0,35
диоды СВЧ, кроме диодов Шоттки	50	50	25	5	1	0,6	0,6
диоды СВЧ Шоттки		—	2,5	1,8	1	0,5	0,5
транзисторы: биполярные, Si полевые, однопереходные	10	8	5,5	2,4	1	0,7	0,35
транзисторы СВЧ биполярные и полевые, включая арсенидогаллиевые	10	—	5	2	1	0,5	0,35
транзисторы: НЧ маломощные, ВЧ ($f > 400$ МГц), Si полевые	10	—	5	2	1	0,5	0,35
тиристоры Si	10	8	5,5	2,4	1	0,7	0,2
оптоэлектронные ППП	10	8	5,5	2,4	1	0,7	0,6
3. Знакосинтезирующие индикаторы:							
полупроводниковые	10	8	5,5	2,4	1	0,7	0,6
люминесцентные	4	—	2	1,5	1	—	—
накаливаемые	5	—	3	2	1	—	—
газоразрядные	4	—	2	1,5	1	0,8	0,8
жидкокристаллические цифровые	10	—	5,5	3	1	—	—

Класс (группа) элементов	Значения K_{Π} для видов приёмки:						
	неизвестный вид приёмки (уровень качества)	ОТК			«5» (ВП, ОВП)	«7» (ОСМ)	«9» (ОС)
		«1»		«3»			
		пластмассовые корпуса (только для ППП)	—				
1. ИМС	10	—	5,5	3,1	1	0,5	0,3
2. ППП, включая оптоэлектронные:							
диоды НЧ (общего назначения, переключаемые, выпрямительные, стабилитроны и др.)	10	8	5,5	2,4	1	0,7	0,35
диоды СВЧ, кроме диодов Шоттки	50	50	25	5	1	0,6	0,6
диоды СВЧ Шоттки	—	—	2,5	1,8	1	0,5	0,5
транзисторы: биполярные, Si полевые, однопереходные	10	8	5,5	2,4	1	0,7	0,35
транзисторы СВЧ биполярные и полевые, включая арсенидогаллиевые	10	—	5	2	1	0,5	0,35
транзисторы: НЧ маломощные, ВЧ ($f > 400$ МГц), Si полевые	10	—	5	2	1	0,5	0,35
тиристоры Si	10	8	5,5	2,4	1	0,7	0,2
оптоэлектронные ППП	10	8	5,5	2,4	1	0,7	0,6
3. Знакоинтегрирующие индикаторы:							
полупроводниковые	10	8	5,5	2,4	1	0,7	0,6
люминесцентные	4	—	2	1,5	1	—	—
накаливаемые	5	—	3	2	1	—	—
газоразрядные	4	—	2	1,5	1	0,8	0,8
жидкокристаллические цифровые	10	—	5,5	3	1	—	—
4. Пьезоэлектрические приборы:							
кварцевые резонаторы	10	—	9	3	1	—	—
прочие приборы	10	—	4	2	1	0,7	0,7
5. Резисторы:							
переменные непроволочные, композиционные и пленочные	10	—	5	3	1	0,8	0,8
потенциометры непроволочные	10	—	5	3	1	—	—
остальные постоянные и переменные резисторы	10	—	3	2	1	0,5	0,3
6. Конденсаторы	10	—	5	3	1	0,5	0,3
7. Трансформаторы:							
питания	30	—	20	10	1	0,5	0,2
ВЧ (радиочастотные)	20	—	10	5	1	0,5	0,2
НЧ, звуковые	10	—	5	3	1	0,4	0,2
импульсные	10	—	4	2	1	0,3	0,2
8. Дроссели, катушки индуктивности:							
все дроссели, кроме питания	10	—	5	3	1	0,5	0,2
дроссели питания	20	—	10	5	1	0,5	0,2
катушки индуктивности	10	—	5	3	1	0,5	0,2
9. Линии задержки	5	—	4	2,1	1	0,5	0,2

Класс (группа) элементов	неизвестный вид приёмки (уровень качества)	Значения K_{Π} для видов приёмки						
		ОТК			«5» (ВП, ОВП)	«7» (ОСМ)	«9» (ОС)	
		«1»		«3»				
		пластмассовые корпуса (только для ППП)	—					
10. Коммутационные изделия:								
тумблеры, кнопочные переключатели	15	—	3	2	1	0,5	0,2	
галетные переключатели	15	—	3	2	1	0,5	0,2	
схемные выключатели, прерыватели (ручные и автоматические, магнитные, тепловые и др.)	15	—	8,4	3	1	0,5	0,2	
11. Соединители НЧ	5	—	2,5	1,5	1	0,5	0,5	
12. Соединители радиочастотные	5	—	2,5	1,5	1	0,5	0,5	
13. Реле	9	—	3	1,5	1	0,5	0,2	
14. Кабели, шнуры, провода монтажные	5	—	2	1,5	1	0,8	0,8	
15. Соединения:								
пайка припоем	—	—	5	3	1	1	1	
сварка	—	—	20	5	1	1	1	
16. Пайные соединения на ПП с металлизированными отверстиями	—	—	5	3	1	1	1	
17. Предохранители, держатели предохранителей	20	—	15	7	1	0,5	0,2	
18. ЭЛТ приёмные, кроме осциллографических без запоминания	5	—	3	2	1	—	—	
19. ЭЛТ приёмные, осциллографические без запоминания	5	—	3	2	1	0,8	0,8	
20. Кинескопы	5	—	3	2	1	—	—	
21. Индикаторные лампочки	5	—	3	2	1	1	1	

Значения коэффициента K_{Π}

Коэффициентом приёмки K_{Π} принимаются во внимание следующие виды приёмки элементов в условиях производства:

- приёмка «1» – приёмка отдела технического контроля предприятий: элементы массового применения;
- приёмка «3» – приёмка отдела технического контроля предприятий: элементы по заказам министерств и ведомств;
- приёмка «5» – общее военное применение (ОВП, ВП);
- приёмка «7» – элементы особой стабильности, выпускаемые малыми партиями (ОСМ);
- приёмка «9» – элементы особой стабильности и повышенной надёжности (ОС);
- коммерческий или неизвестный уровень качества.

Усреднённые значения коэффициента K_{Π} в зависимости от вида приёмки элементов различных классов и групп приведены в таблице 26.

Для элементов с приёмкой «5» значение K_{Π} принято равным 1. Для других видов приёмки приближённые (экстраполированные) значения K_{Π} определены по данным работ [10–13, 15, 16].

Практическое задание:

1. Изучить значения коэффициентов K_{Σ} и K_{Π} и классификацию групп наземной аппаратуры в зависимости от условий эксплуатации.

2. Провести выбор значения коэффициентов K_{Σ} и K_{Π} элементов каждой группы в зависимости от условий эксплуатации и приёмки, входящих в исследуемый модуль РЭУ и внести выбранные значения в итоговую таблицу EXCEL.

3. Подготовить отчет по лабораторной работе в электронном виде.

Лабораторная работа № 9

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТАБЛИЧНОГО ПРОЦЕССОРА EXCEL ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЁТА НАДЁЖНОСТИ РЭУ

Цель: используя табличный процессор EXCEL провести итоговый расчет показателей безотказности исследуемого модуля РЭУ.

Ход работы

Для автоматизации расчета коэффициентов режима работы и математической модели эксплуатационной интенсивности отказов различных групп радиоэлементов будем использовать табличный процессор EXCEL. Использование данного средства позволяет не только сократить время расчета, но и избежать вычислительных ошибок.

Необходимо создать рабочую книгу в EXCEL, на каждой странице которой будем производить расчет конкретной группы элементов. Создаем таблицу постоянных модели для соответствующей группы элементов (например, резисторов), рассчитываем коэффициент электрической нагрузки, вводим формулу математической модели коэффициента режима работы K_p в соответствующую ячейку, и используя маркер авто заполнения произведем расчет всех резисторов, входящих в устройство (рис. 11).

Аналогичным образом производится расчет других групп элементов, для которых таблицы постоянных модели формируются на следующих листах рабочей книги.

Остальные коэффициенты, входящие в математическую модель вероятностей отказов не требуют расчета и подбираются по справочным таблицам. Таким же образом определяется базовая интенсивность отказов λ_b , входящая в математическую модель.

Рассчитаем суммарное значение вероятности отказа для всего изделия в целом. Для этого также будем использовать табличный процессор EXCEL.

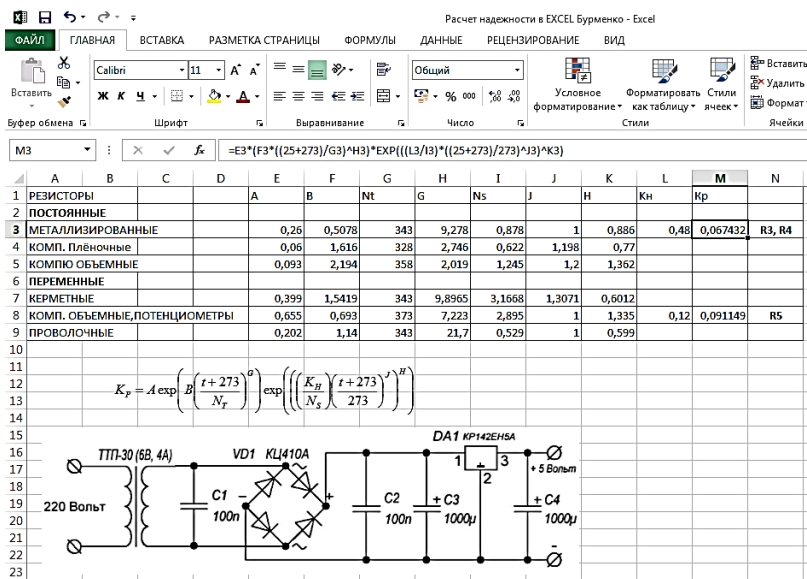


Рис. 11. Пример расчета резисторов в EXCEL

Создаем сводную таблицу, содержащую все элементы и компоненты РЭУ, их математические модели вероятностей отказов, базовые интенсивности отказов и с помощью ссылок вводим рассчитанные коэффициенты режима работы и коэффициенты, подобранные по справочным таблицам (Рисунок 12).

Расчет надежности в EXCEL. Бурменко - Excel																			
ВМЕТ ГЛАВНАЯ ВСТАВКА РАЗМЕТКА СТРАНИЦЫ ФОРМУЛЫ ДАННЫЕ РЕШЕНИЕВАНИЕ ВМЕТ																			
Анна Делова																			
Установить форматирование Стили Форматировать Стили как таблицу Ячейки Вставить Удалить Формат Сводные Найти и выделить Рядов Рядов																			
Буфер обмена Шрифт Выравнивание Число Ссылки																			
=G5*N5*Q5*B5																			
A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T																			
Пассивные элементы					Задача 1. Расчет надежности													n=10^4	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd					Kd													Kd	
Kd																			

Рис. 12. Расчет эксплуатационной безотказности устройства

В соответствующие ячейки вводим формулы для расчета эксплуатационной интенсивности отказов отдельных элементов, а просуммировав итоговый столбец получим эксплуатационную интенсивность отказов Λ_M всего изделия в целом (Λ_M – параметр, определяющий вероятность выхода из строя устройства, которое может быть вызвано в результате выхода из строя любого из элементов схемы).

$$\Lambda_M = 7,94 \cdot 10^{-6} \frac{1}{ч}$$

В соответствии с полученными результатами рассчитаем значения параметров безотказности.

В предположении экспоненциального закона надёжности находим расчётные значения других показателей безотказности:

Наработка на отказ T_0 – время, через которое устройство должно выйти из строя, ввиду износа элементов. По истечении данного времени наступит процесс старения и вероятность выхода из строя устройства резко возрастет:

$$T_0 = \frac{1}{\Lambda_M} \approx 6618.3 ч$$

Вероятность безотказной работы за время $t_p = 1000ч$, $P_M(t_p)$ - процентная вероятность того, что устройство проработает безотказно в течении заданного промежутка времени:

$$P_M(t_p) = e^{\frac{-t_p}{T_0}} \approx 0.893$$

Гамма-процентная наработка до отказа при $\gamma = 95\%$, T_γ – время, в течении которого устройство будет работать безотказно с вероятностью γ (95%).

$$T_\gamma = -T_0 \ln\left(\frac{\gamma}{100}\right) = -6618.3 \cdot \ln 0.95 \approx 452.3 \text{ ч.}$$

Расчеты показателей безотказности проведены с использованием табличного процессора EXCEL. Пример расчета показателей безотказности приведен в Приложении 2.

Практическое задание:

1. Изучить возможности табличного процессора EXCEL для автоматизированного расчета надежности исследуемого модуля РЭУ.
2. Провести итоговый расчет показателей безотказности исследуемого модуля РЭУ с использованием табличного процессора EXCEL.
3. Подготовить отчет по лабораторной работе в электронном виде.
4. Ответьте на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы:

1. Поясните этапы проведения расчета надежности с использованием табличного процессора EXCEL.
2. Как рассчитать эксплуатационную интенсивность отказов исследуемого модуля РЭУ?
3. Что такое наработка на отказ и как она определяется?
4. Как определить и что означает вероятность безотказной работы за время $t_p = 1000 \text{ ч}$?
5. Что показывает гамма-процентная наработка до отказа при $\gamma = 95 \%$?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровиков С. М. Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств. Под редакцией С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Ф.Д. Троян. Минск БГУИР 2010. – 68с. – ISBN 978-985-488-480-6.
2. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности : учеб. для студ. инж.-тех. спец. вузов / С. М. Боровиков. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.
3. ГОСТ 27.002–89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1990.
4. European Organization of the Quality Control Glassary. – Bern : EOQC. 1988. – 24 p.
5. Надёжность технических систем : справочник / Ю. К. Беляев [и др.]; под ред.И. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с.
6. ГОСТ 15150–69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М. : Изд-во стандартов, 1980.
7. ГОСТ 27.003–90. Состав и общие правила задания требований по надёжности. – М. : Изд. стандартов, 1991. – 27 с.
8. ГОСТ 27.301–83. Прогнозирование надёжности изделий при проектировании. – М. : Изд-во стандартов, 1983.
9. ГОСТ 27.301-95. Надёжность в технике. Расчёт надёжности. Основные положения. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 27 с.
10. ГОСТ РВ 20.39.304-98. Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к

внешним воздействующим факторам. – М. : Госстандарт России, 1999. – 59 с.

11. Надёжность изделий электронной техники для устройств народнохозяйственного назначения : справочник / Разработан в соответствии с руководящим документом РД 50-670–88. – М. : ВНИИ «Электронстандарт», 1990. – 188 с.

12. Надёжность электрорадиоизделий, 2002 : справочник / С. Ф. Прытков [и др.]. – М. : ФГУП «22 ЦНИИ МО РФ», 2004. – 574 с.

13. Надёжность электрорадиоизделий, 2006 : справочник / С. Ф. Прытков [и др.]. – М. : ФГУП «22 ЦНИИ МО РФ», 2008. – 641 с.

14. Reliability prediction of electronic equipment : Military Handbook MIL–HDBK-217F. – Washington : Department of defense DC 20301, 1995. – 205 p.

15. A universal model for reliability prediction of Electronics components, PCBs and equipment. RDF 2000 : reliability data handbook / Paris : UTE C 80-810. 2000. – 99 p.

16. 15 Reliability Prediction Model for Electronic Equipment : The Chinese Military/Commercial Standard GJB/z 299B. – Yuntong Forever Sci.-тек. Co. Ltd. China 299B.

17. Ануфриев, Д. М. Конструкционные методы повышения надёжности интегральных схем / Д. М. Ануфриев, М. И. Горлов, А. П. Достанко. – Минск : Интегралполиграф, 2007. – 264 с.

18. Белорусов, Н. И. Электрические кабели, провода и шнуры : справочник / Н. И. Белорусов, А. Е. Саакян, А. И. Яковлева ; под общ. ред. Н. И. Белорусова. – М.: Энергия, 1979. – 416 с.

19. Надёжность технических систем. В. Ю. Шишмарев М.: Академия, 2010. – 304 с.

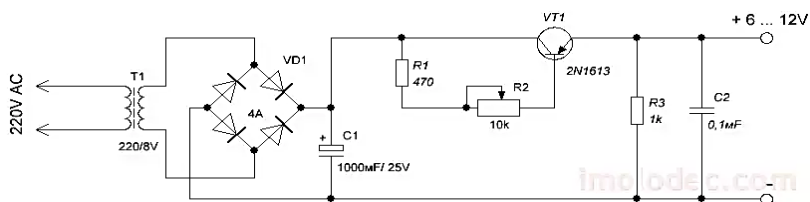
20. Проектирование систем автоматизации технологических процессов. Справочное пособие / Под ред. А. С. Ключева. – М.: Энергоатмиздат, 1990-464 с.

21. Правила устройства электроустановок. Седьмое издание – Ч.: ООО «ИСЦ Дизайн-бюро», 2007.

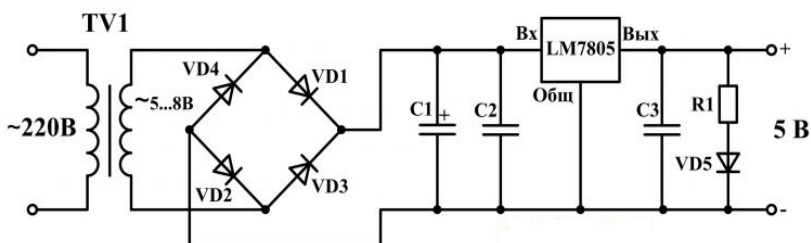
ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

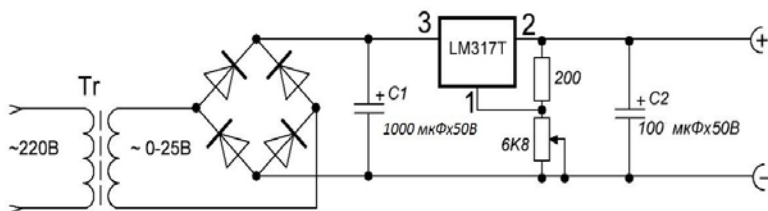
Вариант 1



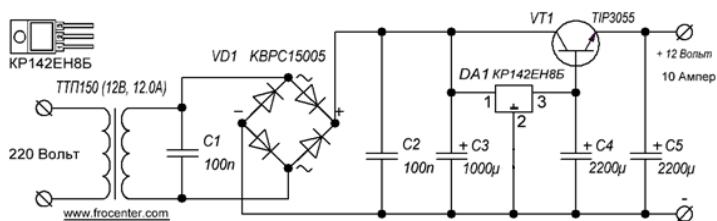
Вариант 2



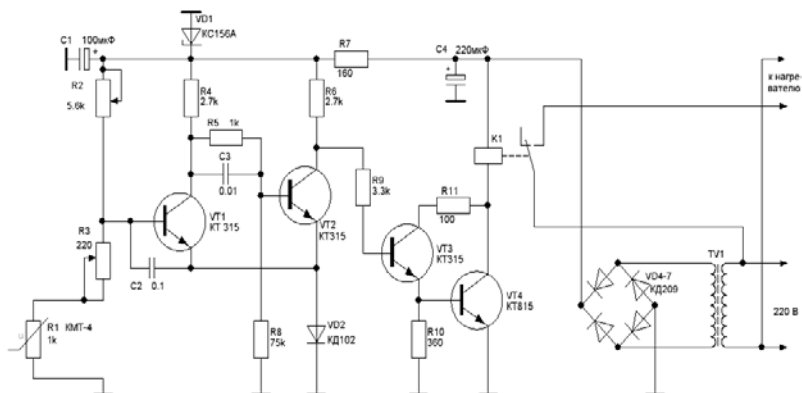
Вариант 3



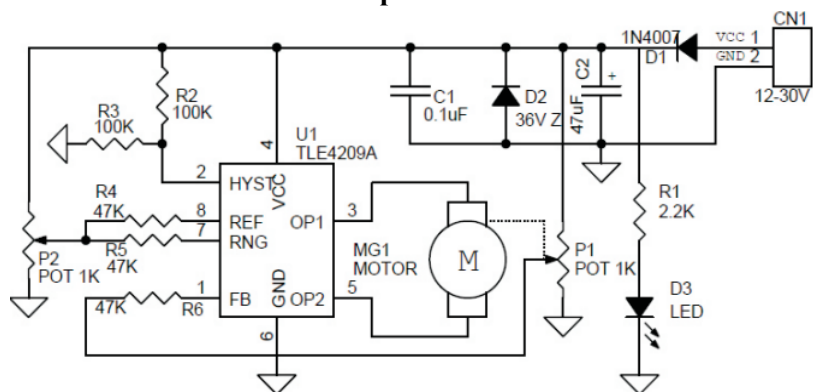
Вариант 4



Вариант 5



Вариант 6



Приложение 2

ПРИМЕР РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ

1. Определим модели вероятностей отказов для каждого из элементов схемы.
2. Из таблиц подберем коэффициенты нагруженности элементов.
3. В соответствии с справочными параметрами рассчитываем коэффициент режима работы.
4. Для режима эксплуатации устройства подбираем коэффициент эксплуатации.
5. По модели вероятности отказов определяем вероятность отказа каждого элемента.
6. Рассчитываем суммарное значение вероятности отказа для всего изделия в целом.
7. В соответствии с полученными результатами рассчитываем значения параметров безотказности.

Драйвер L298N используется радиолюбителями для многофункционального управления двигателями постоянного тока. Схема модуля, состоящая из двух H-мостов, позволяет одновременно подключить один биполярный шаговый двигатель или два коллекторных двигателя постоянного тока. При этом можно менять скорость и направление вращения двигателей. Управление осуществляется путем подачи соответствующих сигналов на командные входы, выполненные в виде штыревых контактов. На рисунке 1 показан внешний вид модуля с кратким описанием всех его компонентов.

OUT1 и OUT2 – разъёмы для подключения первого щётчного двигателя или первой обмотки шагового двигателя;

OUT3 и OUT4 – разъёмы для подключения второго щёточного двигателя или второй обмотки шагового двигателя;

VSS – вход для питания двигателей (максимальный уровень +35V);

GND – общий провод (не забываем соединить с аналогичным входом Arduino!!!);

Vs – вход для питания логики +5V.

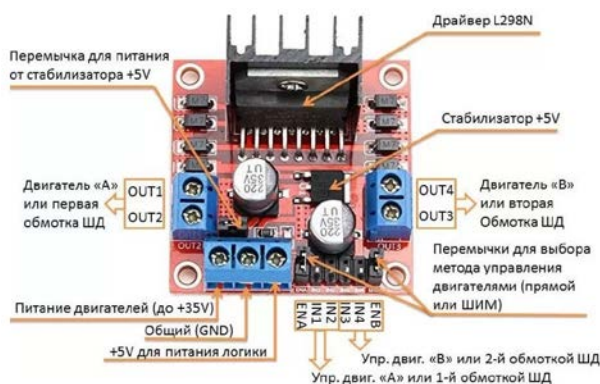


Рис. 1. Внешний вид модуля L298N

Через него напрямую запитана сама микросхема L298N. Существует и второй способ питания, при котором 5В для L298N берется со встроенного в модуль стабилизатора напряжения. В этом случае на разъем подается только питание для двигателей Vss, вывод Vs остается неподключенным, а на плате установлена перемычка питания от стабилизатора, которая ограничит напряжение, питающее двигатели, до допустимых 5В.

IN1, IN2 – контакты управления первым щёточным двигателем или первой обмоткой шагового двигателя.

IN3, IN4 – контакты управления вторым щёточным двигателем или второй обмоткой шагового двигателя.

ENA, ENB – контакты для активации/деактивации первого и второго двигателей или соответствующих обмоток ШД. Подача логической единицы на эти контакты разрешает вращение

двигателей, а логический ноль – запрещает. Для изменения скорости вращения щёточных моторов на эти контакты подаётся ШИМ-сигнал. Для работы с шаговым двигателем, как правило, на эти контакты ставят переключки, обеспечивающие постоянную подтяжку к +5V.

На рисунке 2 представлена электрическая принципиальная схема модуля L298N.

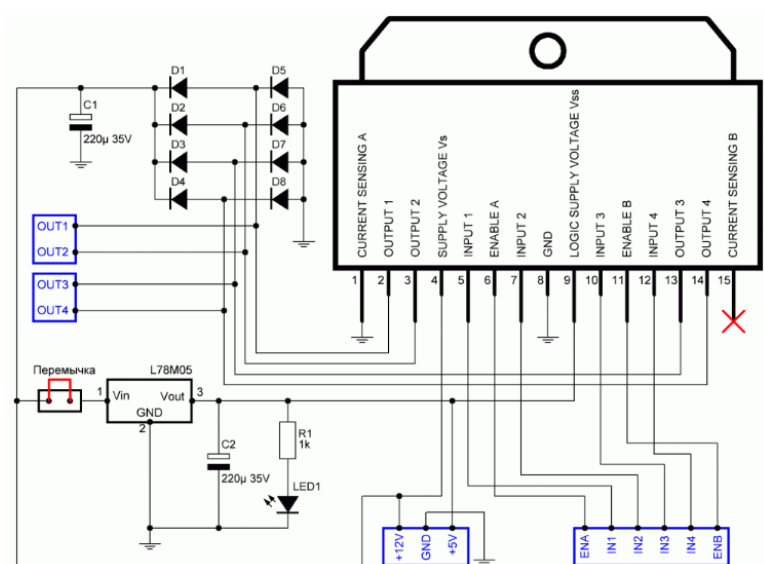


Рис. 2. Схема электрическая принципиальная драйвера двигателя L289

Основным элементом модуля является микросхема L298N, включающая в себя два полноценных Н-моста. Каждый Н-мост выполнен в виде сборки из четырех транзисторных ключей с подключенной в центре нагрузкой в виде обмотки двигателя. Такой подход позволяет менять полярность в обмотке и, как следствие, направление вращения двигателя путем чередования пар открытых и закрытых ключей. Более наглядно этот процесс продемонстрирован на рисунке 3.

На рисунке изображены два транзисторных моста Н-типа. В первом случае на вход IN1 подаётся логическая единица, а на вход IN2 – логический ноль. Так как транзисторы в схеме моста имеют разный тип проводимости, то при таком входном сигнале транзисторы T1 и T4 останутся в закрытом состоянии, в то время, как через транзисторы T2 и T3 потечёт ток. Ввиду того, что единственный путь протекания тока лежит через обмотку двигателя, то последний окажется подключен правой клеммой к плюсу питания, а левой к минусу. Всё это приведёт к вращению мотора в определённом направлении. Абсолютно противоположная картина показана на нижнем рисунке. Здесь IN3 установлен в логический ноль, а IN4 в логическую единицу. Теперь ток течёт в обратном направлении (левая клемма – плюс, правая – минус), заставляя второй двигатель крутиться в противоположную сторону.

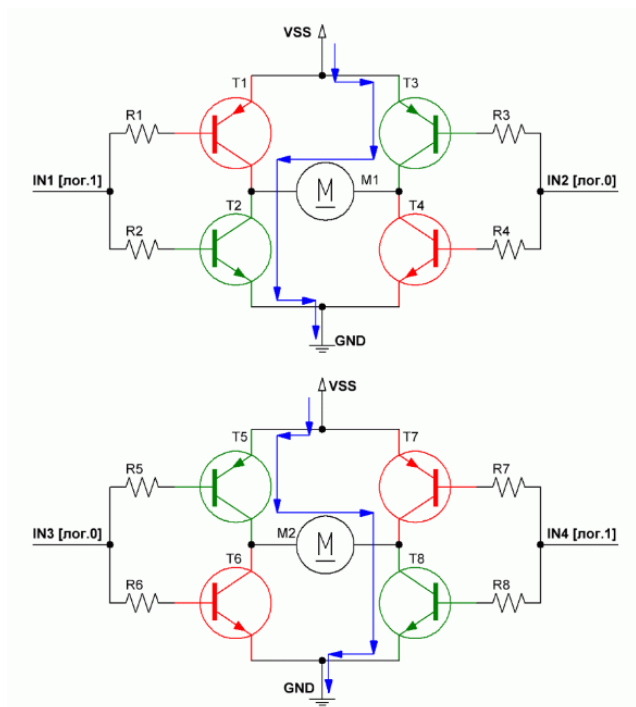


Рис. 3. Транзисторные мосты Н-типа

Технические характеристики

- Напряжение питания логики: 5V;
- Потребляемый логикой ток: 36mA;
- Напряжение питания моторов: от 5V до 35V;
- Рабочий ток драйвера: 2A;
- Пиковый ток драйвера: 3A;
- Максимальная мощность: 20 Вт (при температуре 75°C);
- Диапазон рабочих температур: -25°C...+135°C;
- Размеры модуля: 43.5x 43.2 x 29.4 мм;

Таблица 1

Элементы и компоненты, входящие в устройство

Название элемента	Функциональное обозначение	Тип	Режим работы	Кол-во	Примечание
ИМС	DA1	L298N	типовой	1	• Диапазон рабочих температур: 25°C...+135 °C; - Потребляемый логикой ток: 36mA 8 элементов
Резисторы	R1	Постоянный	Токоограничивающий	1	1кОм/ Номинальная рассеиваемая мощность: 0,125 Вт;
Диоды	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8	Кремниевый импульсный	выпрямление	8	1A

Название элемента	Функциональное обозначение	Тип	Режим работы	Кол-во	Примечание
Оптоэлектронный элемент	LED1	5 мм	излучающий	1	- Рабочая температура: -20 ... +80 °C - Диаметр, (мм): 5 - Цвет свечения: Белый, 6000-6500K - Номинальное напряжение, В: 3.0 – 3.4 - Вес, грамм: 0.18 - Максимальный обратный ток, мкА: 10 (при Uобр. = 5В) - Рабочий ток – 20 мА (напряжение 3.0 – 3.4В)
Конденсаторы Электролитические	C1, C2	Электролитический полярный	-	2	0,00022Ф/ 35В
Стабилитрон	U1	L78M05	Стабилизатор напряжения	1	5В/35В Imax=500mA 0-150

Расчёт коэффициентов электрической нагрузки элементов

Реальный уровень безотказности элементов зависит от коэффициентов их электрической нагрузки, определяемых отношением:

$$K_n = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{ном}}},$$

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.

В качестве F выбирают такую электрическую характеристику элемента, которая в наибольшей степени влияет на его безотказность (табл.2).

Недопустимо использовать элементы с коэффициентом электрической нагрузки $K_H > 1$ даже по одному из параметров электрического режима. Считают [1], что для типовых элементов РЭС оптимальные значения коэффициентов нагрузки $K_{H.опт} \approx 0,2 \dots 0,6$.

Расчет коэффициентов электрической нагрузки элементов, входящих в устройство представлен в таблице 3.

Таблица 2

Электрические характеристики, используемые

для определения $K_H = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{ном}}}$

Группа элементов	Характеристика F	Группа элементов	Характеристика F
1. Резисторы	Рассеиваемая мощность	7. Тиристоры	Средний прямой ток, рассеиваемая мощность
2. Конденсаторы	Прикладываемое напряжение	8. Трансформаторы	Мощность
3. Варикапы полупроводниковые. Транзисторы, транзисторные сборки. Диоды СВЧ	Рассеиваемая мощность	9. Дроссели, катушки индуктивности	Ток подмагничивания или протекающий ток
4. Диоды, кроме стабилитронов, диодные сборки	Средний прямой ток	10. Реле	Коммутируемый ток
5. Полупроводниковые (ПП) знакосинтезирующие индикаторы, оптопары, ППИ излучатели	Средний прямой ток	11. Соединители (разъёмы), элементы коммутации (переключатели, тумблеры, кнопки и т.п.)	Протекающий ток
6. Стабилитроны	Ток стабилизации, рассеиваемая мощность	12. Кабели, шнуры, монтажные провода	Плотность тока в проводе

Таблица 3

Коэффициенты электрической нагрузки

Тип радиоэлемента	Обозначение	Г _{раб}	Г _{ном}	К _н
ИМС	DA1			
Резистор	R1	0,025	0,125	0,2
Диоды	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8	0,25	1	0,25
Конденсаторы	C1, C2	12	35	0,34
Стабилитрон	U1	0,1	0,5	0,2

Расчёт коэффициентов радиоэлектронных элементов*Интегральные микросхемы*

Для определения коэффициента $K_{ис}$, учитывающего количество элементов ИМС или бит, можно воспользоваться математической моделью:

$$K_{ис} = AN^S, \quad (1)$$

где A , S – постоянные коэффициенты модели, N – количество элементов ИМС

Таблица 4

Постоянные модели (1)

Группа ИМС	A	S	B
1. Полупроводниковые цифровые (логические, арифметические, микропроцессоры, регистры сдвига и др.)	0,336	0,288	0,021
2. Оперативные запоминающие устройства (ОЗУ)	0,468	0,168	0,021
3. Постоянные запоминающие устройства (ПЗУ) и программируемые ПЗУ (ППЗУ)	0,963	0,128	0,021
4. Перепрограммируемые ПЗУ (РПЗУ)	1,113	0,128	0,021
5. Аналоговые ИМС	0,478	0,253	0,023
6. Гибридные интегральные ИМС	0,796	0,120	0,024

Значения коэффициента K_t могут быть получены по выражению:

$$K_t = \exp[B(t_{\text{окр}} - 25)],$$

где B – константа, зависящая от функционального назначения ИМС, $t_{окр}$ – температура окружающей среды.

Для ИМС, работа которых допускается в облегченных электрических режимах, значения коэффициента K_p могут быть рассчитаны по математической модели:

$$K_p = 0,045 \exp(3,1 K_{обл}) \exp[B(t_{окр} - 25)],$$

где $K_{обл}$ – отношение рабочей электрической нагрузки к максимально допустимой.

Значение $t_{окр}$ может определяться по выражению:

$$t_{окр} = t_{раб\ max} + \Delta t_3,$$

где $t_{раб\ max}$ – верхнее значение рабочей температуры РЭУ;

Δt_3 – перегрев в нагретой зоне конструкции РЭУ (обычно $\Delta t_3 \leq 25 \dots 30$).

Значения $K_{корп}$ и K_V следует выбирать из таблицы 5:

Таблица 5

Значения коэффициентов

Значения коэффициента $K_{корп}$

Корпус	$K_{корп}$	Корпус	$K_{корп}$
Все корпуса, кроме пластмассовых (полимерных)	1,0	Пластмассовые (полимерные)	3,0

Значения коэффициента K_V в зависимости от максимальных значений напряжения питания

Технология	Значение K_V для напряжения источника питания, В		
	до 10	> 10 до 12,6	> 12,6 до 15
КМОП	1,0	3,0	10,0
Прочие виды технологий	1,0		

Расчет коэффициентов математической модели эксплуатационной интенсивности отказов, необходимый для расчета надежности ИМС представлен в таблице 6.

Коэффициенты ИМС

ИМС	DA1
A	0,336
S	0,288
B	0,021
Кобл	0,33333
Токр	160
Кр	2,15381
Кис	2,02586
N	512
Ккорп	3
Kv	1
λб	2,3E-08
Кэ	1,7
Кп	5,5

Резисторы

Значения коэффициента режима работы K_p – рассчитываются по модели:

$$K_p = A \exp \left(B \left(\frac{t + 273}{N_T} \right)^G \right) \exp \left(\left(\left(\frac{K_H}{N_S} \right) \left(\frac{t + 273}{273} \right)^J \right)^H \right) \quad (2)$$

где t – температура окружающей среды (корпуса элемента), °C;

K_H – коэффициент электрической нагрузки резистора по мощности;

A, B, N_T, G, N_S, J, H – постоянные коэффициенты.

K_R – коэффициент, зависящий от значения номинальной ёмкости;

K_M – коэффициент, зависящий от значения номинальной мощности (для металлодиэлектрических резисторов)

Таблица 7

Постоянные коэффициенты модели (2)

Группа резисторов	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>N_T</i>	<i>G</i>	<i>N_S</i>	<i>J</i>	<i>H</i>
Резисторы постоянные:							
металлодиэлектрические, металлизированные	0,260	0,5078	343	9,278	0,878	1	0,886
композиционные плёночные	0,06	1,616	328	2,746	0,622	1,198	0,770
композиционные объёмные	0,093	2,194	358	2,019	1,245	1,2	1,362
Резисторы переменные:							
непроволочные керметные	0,399	1,5419	343	9,8965	3,1668	1,3071	0,6012
композиционные объёмные, потенциометры	0,655	0,693	373	7,223	2,895	1	1,335
проволочные	0,202	1,14	343	21,7	0,529	1	0,599

Расчет коэффициентов математической модели эксплуатационной интенсивности отказов, необходимый для расчета надежности резистора представлен в таблице 8.

Таблица 8

Характеристики резистора

Резистор	R1
A	0,26
B	0,5078
Nt	343
G	9,278
Ns	0,878
J	1
H	0,886
Kн	0,2
Kр	0,39934
λб	4,4E-08
Kr	1,9
Kэ	2
Kп	3

Таблица 9

Значения коэффициентов K_R , K_M Значения коэффициента K_M для металлодиэлектрических резисторов

Мощность, Вт	K_M	Мощность, Вт	K_M	Мощность, Вт	K_M
0,062–0,5	0,7	1–2	1,5	5–10	4,5

Значения коэффициента K_R

Диапазон сопротивлений	K_R	Диапазон сопротивлений	K_R	Диапазон сопротивлений	K_R
Резисторы постоянные неперывочные: металлодиэлектрические					
< 1 кОм	1,0	≥ 1 кОм < 100 кОм	0,7	≥ 100 кОм < 1 МОм	2,0
углеродистые					
≤ 100 кОм	0,5	> 100 кОм ≤ 1 МОм	2,7	> 1 МОм	0,7
Резисторы переменные: неперывочные керметные					
> 10 Ом ≤ 100 Ом	1,6	> 100 Ом ≤ 330 Ом	1,4	> 330 Ом	1,0
проволочные					
≤ 1 кОм	1,9	> 1 кОм ≤ 10 кОм	0,5	> 10 кОм ≤ 100 кОм	0,9

Таблица 10

Базовые интенсивности отказов резисторов

Группа элементов	$\lambda_B \cdot 10^{-6} 1/ч$
Резисторы постоянные неперывочные:	
металлодиэлектрические, металлизированные	0,044
композиционные	0,034
Резисторы переменные:	
неперывочные	0,179
проволочные	0,183
Терморезисторы	0,007

Полупроводниковые приборы

Значения коэффициента K_p могут быть рассчитаны с помощью математической модели:

$$K_p = A \exp \left(\frac{N_T}{273 + t_{окр} + \Delta t K_H} + \left(\frac{273 + t_{окр} + \Delta t K_H}{T_M} \right)^L \right) \quad (3)$$

где $t_{окр}$ – температура окружающей среды (корпуса элемента), °С;

K_H – коэффициент электрической нагрузки;

где A , N_T , L , T_M , Δt – константы модели.

Таблица 11

Константы модели (3)

Группа элементов	A	N_T	T_M	L	Δt
Диоды, кроме стабилитронов. Диодные сборки	44,1025	-2138	448	17,7	150
Стабилитроны	2,1935	-800	448	14,0	150
Транзисторы биполярные, кроме мощных СВЧ. Транзисторные сборки. Полевые транзисторы	5,2	-1162	448	13,8	150
Тиристоры	37,2727	-2050	448	9,6	150

Значение коэффициента K_f следует выбирать из таблицы 12.

Таблица 12

Влияние функционального режима работы на коэффициент K_f

Группа приборов	Функциональный режим работы	K_f
Диоды выпрямительные, универсальные, импульсные, столбы выпрямительные, варикапы подстроечные, диодные сборки	Линейный	1,0
	Переключающий	0,6
	Выпрямительный	1,5
Транзисторы биполярные, кроме мощных СВЧ. Транзисторные сборки	Линейный	1,5
	Переключающий	0,7
	Генераторный	0,7
	Высоковольтные приборы	1,5
Транзисторы полевые	Кремниевые приборы:	
	линейный	1,5
	переключающий	0,7
	генераторный	1,0
	СВЧ-диапазона	5,0
	Арсенидогаллиевые приборы	7,5

Расчет коэффициентов математической модели эксплуатационной интенсивности отказов, необходимый для расчета надежности диодов представлен в таблице 13.

Характеристики полупроводниковых приборов

Полупроводниковые приборы	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8	U1
A	44,1025	2,1935
Nt	-2138	-800
Tm	448	448
L	17,7	14
Δt	150	150
Kn	0,25	0,2
Kp	0,07577	0,19382
λб	9,1E-08	4,1E-09
Kф	1	
Kд	0,6	
Ku	0,7	
Kэ	2	2,5
Kп	5,5	5,5

Конденсаторы

Значения коэффициента K_p могут быть рассчитаны с помощью математической модели:

$$K_p = A \left(\left(\frac{K_H}{N_s} \right)^H + 1 \right) \exp \left(B \left(\frac{t_{окр} + 273}{N_T} \right)^G \right) \quad (4)$$

где $t_{окр}$ – температура окружающей среды (корпуса элемента), °C;

K_H – коэффициент электрической нагрузки конденсатора по напряжению;

A, B, N_T, G, N_s, H – постоянные коэффициенты (табл. 14).

Таблица 14

Постоянные коэффициенты модели (2)

Группа конденсаторов	A	B	N_T	G	N_S	H
Керамические, стеклокерамические, подстроечные с твёрдым диэлектриком	$5,909 \cdot 10^{-7}$	14,3	398	1	0,3	3
Слюдяные	$9,885 \cdot 10^{-8}$	16	358	1	0,4	3
С органическим синтетическим диэлектриком	$9,259 \cdot 10^{-3}$	2,5	358	18	0,4	5
Бумажные и металобумажные	$9,583 \cdot 10^{-3}$	2,5	358	18	0,4	5
Оксидно-электролитические алюминиевые	$3,59 \cdot 10^{-2}$	4,09	358	5,9	0,55	3

Таблица 15

Модели для подсчёта коэффициента K_C

Группа конденсаторов	Модель	Примечание
Тонкоплёночные с неорганическим диэлектриком	$K_C = 1$	–
Керамические и стеклокерамические	$K_C = 0,4C^{0,12}$	C в пФ
Слюдяные	$K_C = 0,4C^{0,14}$	C в пФ
Бумажные и металобумажные	$K_C = C^{0,05}$	C в мкФ
С органическим синтетическим диэлектриком	$K_C = C^{0,05}$	C в мкФ
Оксидно-электролитические алюминиевые	$K_C = 0,2C^{0,23}$	C в мкФ

Таблица 16

Базовые интенсивности отказов конденсаторов

Группа элементов	$\lambda_B, \times 10^{-6} \text{ 1/ч}$
слюдяные	0,04
керамические	0,022
бумажные и металобумажные	0,019
с органическим синтетическим диэлектриком	0,028
электролитические алюминиевые	0,173

Расчет коэффициентов математической модели эксплуатационной интенсивности отказов, необходимый для расчета надежности конденсаторов представлен в таблице 17.

Таблица 17

Характеристики конденсаторов

Конденсаторы	C1, C2
A	5,909E-07
B	14,3
Nt	398
G	1
Ns	0,3
H	3
Kn	0,34
Kp	0,0648181
λб	2,2E-08
Kс	4,0100585
Kэ	1,5
Kп	5

Таблица 18

Габаритные размеры конденсаторов

WV(S V), В	6.3(8)		10(13)		16(20)		25(32)		35(44)		50(62)		63(79)	
C, мкФ	Dx L	m A	Dx L	m A	Dx L	m A	Dx L	m A	Dx L	m A	Dx L	m A	Dx L	m A
0.47											4x 7	4	4x 7	5
1											4x 7	9	4x 7	11
2.2											4x 7	19	4x 7	21
3.3											4x 7	24	4x 7	26
4.7									4x 7	24	5x 7	29	5x 7	33
10					4x 7	29	5x 7	32	5x 7	36	6x 7	44		
22	4x 7	34	5x 7	38	5x 7	45	6x 7	51	6x 7	60	8x 7	65		
33	5x	42	5x	47	6x	60	6x	65	8x	72				

	7		7		7		7		7				
47	5х 7	50	6х 7	65	6х 7	70	8х 7	78					
100	6х 7	77	6х 7	87	6х 7	90							
220	8х 7	13 0	8х 7	14 0									

Таблица 19

Значение коэффициента K_d

Группа приборов	Нагрузка	Значение нагрузки	K_d
Диоды, диодные сборки	Максимально допустимый по ТУ средний прямой ток $I_{пр.ср \max \text{ ТУ, А}}$	≤ 1 $> 1 \leq 3$ $> 3 \leq 10$ $> 10 \leq 20$	0,6 0,8 1,0 2,0
Транзисторы биполярные, кроме мощных СВЧ. Транзисторные сборки. Варикапы подстроечные	Максимально допустимая по ТУ рассеиваемая мощность $P_{\max \text{ ТУ, Вт}}$	≤ 1 $> 1 \leq 5$ $> 5 \leq 20$ $> 20 \leq 50$ $> 50 \leq 200$	0,5 0,8 1,0 1,3 2,5
Тиристоры	Максимально допустимый по ТУ средний прямой ток $I_{пр.ср \max \text{ ТУ, А}}$	≤ 1 $> 1 \leq 5$ $> 5 \leq 25$ $> 25 \leq 50$	1,0 3,0 6,0 10,0

Таблица 20

Значение коэффициента K_U

Группа приборов	Коэффициент нагрузки по напряжению $K_H^{(U)}$	Значение или модель расчёта K_U
Диоды, варикапы подстроечные, диодные сборки ¹	От 0 до 0,6 $> 0,6$ до 1,0	0,7 $K_U = 1/[2,11 - 1,11K_H^{(U)}]$
Транзисторы биполярные, кроме мощных СВЧ. Транзисторные сборки.	От 0 до 0,5 $> 0,5$ до 1,0	0,5 $K_U = 1/[2,42 - 2,09K_H^{(U)}]$

Таблица 21

Базовые интенсивности отказов ППП

Группа элементов	$\lambda_{\text{Б}}, \times 10^{-6} \text{ 1/ч}$
Диоды выпрямительные	0,091
Столбы (мосты) выпрямительные	0,21
Диоды импульсные	0,025
Варикапы подстроечные	0,022
Стабилитроны	0,0041
Транзисторы биполярные кремниевые, кроме СВЧ	0,044
Транзисторы полевые: кремниевые арсенидогаллиевые	0,065 0,578
Тиристоры кремниевые	0,2
Диоды СВЧ: кремниевые (кроме умножительных и настроечных) кремниевые умножительные и настроечные арсенидогаллиевые	0,162 1,61 0,21
Транзисторы СВЧ малой и средней мощности	0,064
Транзисторы СВЧ большой мощности	0,18

Расчет эксплуатационной безотказности элементов

Основными элементами устройства являются резисторы, конденсаторы, диодные сборки, диоды выпрямительные, печатная плата, соединения пайкой волной, в соответствии с которыми будут вестись расчеты вероятностей отказов элементов. Математические модели определения интенсивности отказов элементов схемы приведены в таблице 22.

Таблица 22

Математические модели определения интенсивности отказов

Класс (группа) элементов	Вид математической модели
Интегральные микросхемы (типовой электрический режим работы)	$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{т}} K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_{\text{У}} K_{\Sigma} K_{\text{П}}$
Интегральные микросхемы, работающие в облегченных электрических режимах	$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_{\text{У}} K_{\Sigma} K_{\text{П}}$
Диоды, кроме стабилитронов. Диодные сборки	$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\Phi} K_{\text{Д}} K_{\text{У}} K_{\Sigma} K_{\text{П}}$
Стабилитроны	$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\Sigma} K_{\text{П}}$

Транзисторы биполярные, транзисторные сборки	$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_\Phi K_D K_U K_3 K_\Pi$
Транзисторы полевые	$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_\Phi K_3 K_\Pi$
Тиристоры	$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_D K_3 K_\Pi$
Диоды СВЧ	$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_D K_3 K_\Pi$
Транзисторы биполярные мощные СВЧ	$\lambda_3 = \lambda_B K_I K_F K_\Phi K_3 K_\Pi$
Оптоэлектронные элементы (светодиоды, оптопары)	$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_3 K_\Pi$
Микросхемы оптоэлектронные (типовой электрический режим работы)	$\lambda_3 = \lambda_B K_3 K_\Pi$
Конденсаторы неполярные, оксидно-электролитические, кроме импульсных	$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_C K_3 K_\Pi$
Оксидно-электролитические импульсные	$\lambda_3 = \lambda_B K_I K_C K_3 K_\Pi$
Резисторы постоянные: металлюдиэлектрические металлизированные, композиционные	$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_R K_M K_A K_3 K_\Pi$ $\lambda_3 = \lambda_B K_P K_R K_3 K_\Pi$
Резисторы переменные: проволочные	$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_R K_3 K_\Pi$
непроволочные	$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_R K_U K_3 K_\Pi$
Терморезисторы	$\lambda_3 = \lambda_B K_3$
Элементы коммутации (переключатели, тумблеры, кнопки и т.п.)	$\lambda_3 = (\lambda_B^{(к.и)} K_K K_F + \lambda_B^{(вкл)} NF) K_P K_3 K_\Pi$
Соединители (разъёмы): низкочастотные	$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_K K_A K_3 K_\Pi$
радиочастотные	$\lambda_3 = \lambda_B K_I K_K K_A K_3 K_\Pi$
Индикаторы	
полупроводниковые	$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_3 K_\Pi$
вакуумные люминесцентные	$\lambda_3 = \lambda_B K_I K_3 K_\Pi$
другие индикаторы, ЭЛТ, кинескопы и т. п.	$\lambda_3 = \lambda_B K_3 K_\Pi$
Трансформаторы	$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_3 K_\Pi$
Дроссели, катушки индуктивности	$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_3 K_\Pi$
Реле электромагнитные общего назначения	$\lambda_3 = (\lambda_B^{(L)} K_P^{(L)} K_F K_\Pi^{(L)} + \lambda_B^{(ном)} FK_P K_K K_\Pi) K_3$
Реле и автоматы защиты	

Прочие элементы и компоненты	
Резонаторы пьезоэлектрические	$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{б}} K_{\text{т}} K_{\text{э}} K_{\text{п}}$
Предохранители	$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{б}} K_{\text{т}} K_{\text{э}} K_{\text{п}}$
Платы со сквозными металлизированными отверстиями (пайки отверстий)	$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{б}} [N_1 K_{\text{сл}} + N_2 (K_{\text{сл}} + 13)] K_{\text{т}} K_{\text{э}} K_{\text{п}}$
Соединения, в том числе пайкой ²	$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{б}} K_{\text{т}} K_{\text{э}} K_{\text{п}}$
Электрические лампочки	$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{б}} K_{\text{э}} K_{\text{п}}$, принимается $K_{\text{э}} = 1$
Кабели, шнуры, монтажные провода	$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{б}} L K_{\text{т}} K_{\text{э}} K_{\text{п}}$

Справочные данные для определения параметров модели получаем из учебно-методического пособия «Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств», Боровиков С.М., Минск, БГУИР, 2010.

При расчете эксплуатационной безотказности РЭУ будем считать, что схемотехническое исполнение устройства "Регулируемый блок питания" таково, что все элементы работают в типовых электрических режимах.

Результаты расчета эксплуатационной безотказности устройства сведены в таблице 23.

Расчет эксплуатационной безотказности элементов устройства

Позиционное обозначение	Кол-во шт	К _П	λб	Вид математической модели расчета	Значение поправочного коэффициента															η _{л-сг}
					К _{ис}	К _р	К _г	К _{хорг}	К _в	К _о	К _д	К _г	К _с	К _м	К _г	К _з	К _и	∏ _i K _i		
DA1	1		0,0000000023	λз=λб Кр Кис Кхорг Кв Кз Кп	2,0259	2,1538		3	1							2	5,50	122,39	3E-06	
R1	1	0,2	0,0000000044	λз=λб Кр Кг Кз Кп		0,3993										1,9	2	3	4,5325	2E-07
D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8	8	0,25	0,0000000091	λз=λб Кр Кф Кд Ку Кз Кп		0,0758			1	0,6	1					2	5,5	0,35	3E-07	
C1, C2	2	0,34	4,1E-09	λз=λб Кр Кс Кз Кп		0,0618							4,0101			3	5,5	3,574	3E-08	
U1	1	0,2	0,0000000022	λз=λб Кр Кз Кп		0,1938										2	5	1,4537	3E-08	
Соединения пайкой	38		6,9E-11	λз=λб Кг Кз Кп				1,31								2	5	13,05	3E-08	

Определяем для каждого элемента или группы элементов произведение поправочных коэффициентов и суммарное значение эксплуатационной интенсивности отказов λ_{Σ} :

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma j} \cdot n_j = \left(\lambda_{\Sigma j} \prod_i K_i \right) n_i$$

где $\lambda_{\Sigma j}$ - эксплуатационная интенсивность отказов j-й группы;

n_j – количество элементов в j-й группе;

Определяем эксплуатационную интенсивность отказов печатной платы с металлизированными отверстиями.

$$\lambda_{\Sigma} = 0,000085 \cdot 10^{-6} \cdot 2,5[26 \cdot 1 \cdot 0,1 + 1 \cdot (1 + 13)] = 3,52 \cdot 10^{-9}$$

Определяем общую эксплуатационную интенсивность отказов соединений пайкой для отверстий, где нет металлизации:

$$\lambda_{\Sigma} = n_j \lambda_{\Sigma \text{Б}} K_{\Sigma} K_{\Sigma} K_{\Sigma}$$

где $\lambda_{\Sigma \text{Б}}$ - базовая интенсивность отказов соединения;

K_{Σ} – коэффициент, зависящий от жесткости условий эксплуатации;

$$\lambda_{\Sigma} = 38 \cdot 69 \cdot 10^{-12} \cdot 1,31 \cdot 2 \cdot 5 = 3,42171 \cdot 10^{-8}$$

Подсчитываем эксплуатационную интенсивность отказов модуля РЭУ (Λ_M). Для этого просуммируем значения, приведённые в последнем столбце таблицы :

$$\Lambda_M = 3,36565 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ч}}$$

В предположении экспоненциального закона надёжности находим расчётные значения других показателей безотказности:

– Нарботка на отказ:

$$T_0 = \frac{1}{\Lambda_M} \approx 297119 \text{ ч};$$

– Вероятность безотказной работы за время $t_p = 1000\text{ч}$:

$$P_M(t_p) = e^{-\frac{t_p}{T_0}} \approx 0.996;$$

– гамма-процентная наработка до отказа при $\gamma = 95\%$:

$$T_{\gamma} = -T_0 \ln\left(\frac{\gamma}{100}\right) = -6618.3 \cdot \ln 0.95 \approx 15240,25 \text{ ч.}$$

Результаты расчетов показателей безотказности приведены в таблице 24.

Таблица 24

Показатели безотказности работы устройства

$\Lambda_M, \frac{1}{\text{ч}}$	$T_0, \text{ч}$	$P_M(t_p)$	$T_{\gamma}, \text{ч}$
3,36565E-06	297119,7765	0,996640011	15240,25217

Λ_M – параметр, определяющий вероятность выхода из строя устройства, которое может быть вызвано в результате выхода из строя любого из элементов схемы.

T_0 – время, через которое устройство должно выйти из строя, ввиду износа элементов. По истечении данного времени наступит процесс старения и вероятность выхода из строя устройства резко возрастет.

$P_M(t_p)$ – процентная вероятность того, что устройство проработает безотказно в течении заданного промежутка времени.

T_{γ} – время, в течении которого устройство будет работать безотказно с вероятностью γ (95%).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данного квалификационного проекта произведена оценка показателей безотказности драйвера двигателя L298N. По условию было необходимо использовать расчетный способ оценки. Для осуществления данного проекта была разработана схема электрическая принципиальная и исходные данные к ней, которые подлежали уточнению.

Для оценки безотказности работы устройства был использован экспоненциальный закон надежности. В этом случае время до отказа распределяется по экспоненциальной модели. Проводя анализ вероятности выхода из строя каждого элемента схемы, получили ряд значений случайной величины, характеризующей вероятность отказа того или иного элемента в зависимости от его величины и параметров влияющей на него среды.

Рассчитав показатели надёжности, было выяснено, что вероятность безотказной работы устройства в течении 1000 часов равна примерно 99,6%, и устройство способно проработать до отказа (T_0) более 297119 часов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Список сокращений и определений	6
Основы надёжности автоматизированных систем и радиоэлектронных устройств	8
Общая характеристика показателей надёжности	16
Единичные показатели безотказности и ремонтпригодности.....	22
Анализ задачи расчета надежности РЭУ.....	27
Интенсивность отказов как основная характеристика безотказности элементов. Коэффициент электрической нагрузки элементов	34
Методы расчёта показателей надёжности.....	39
Модели прогнозирования эксплуатационной безотказности элементов	44
Базовые интенсивности отказов групп элементов и компонентов РЭС	52
Последовательность выполнения расчёта показателей безотказности.....	57
Лабораторная работа № 1. Расчет коэффициентов математической модели интегральных микросхем	62
Лабораторная работа № 2. Расчет коэффициентов математической модели полупроводниковых приборов (ППП).....	66
Лабораторная работа № 3. Расчет коэффициентов математической модели оптоэлектронных элементов	70
Лабораторная работа № 4. Расчет коэффициентов математической модели конденсаторов	74
Лабораторная работа № 5. Расчет коэффициентов математической модели резисторов.....	77
Лабораторная работа № 6. Расчет коэффициентов математической модели элементов коммутации и соединителей (разъемов)	81
Лабораторная работа № 7. Расчет коэффициентов математической модели трансформаторов.....	85

Лабораторная работа № 8. Выбор значения коэффициентов K_{Σ} и K_{Π}	88
Лабораторная работа № 9. Использование табличного процессора Excel для проведения автоматизированного расчёта надёжности РЭУ	95
Список литературы.....	99
Приложения.....	101
Заключение.....	127

Учебное издание

**Диагностика и надежность автоматизированных систем
и интеллектуальных систем управления**
Учебно-методическое пособие

Составители:

**Деткова Анна Васильевна,
Котиц Дмитрий Анатольевич**

Компьютерная верстка: *И. И. Головачук*
Издается в авторской редакции

ИЛ № 06150. Сер. АЮ от 21.02.02.
Подписано в печать 12.02.24. Формат 60х90/16.
Уч.-изд. л. 8,1. Электронное издание. Заказ № 213.