

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П.КОРОЛЁВА»

А.В. Зеленский, Г.Ф. Краснощекова

ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
Часть 1

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2008

УДК СГАУ 004 (075)
ББК 32.81
З 486

Рецензенты: проф. А. Д. Краснощёков,
доц. А. И. Колпаков.

Зеленский А.В.
З 486 Основы конструирования электронных средств: учеб. пособие.
Ч.1 / А.В. Зеленский, Г.Ф. Краснощекова. – Самара: Изд-во Самар.
гос. аэрокосм. ун-та, 2008. – 76 с.

ISBN 978-5-7883-0666-7

Изложены принципы проектирования электронных средств различного назначения. Приведены сведения из теории построения моделей, показаны методы обеспечения надежной работы электронных средств, правила конструирования. Рассмотрены вопросы выбора и обоснования метода конструирования и электрического монтажа электронных средств.

Учебное пособие предназначено для студентов заочной формы обучения специальности 210201 «Проектирование и технология ЭС».

УДК СГАУ 004(075)
ББК 32.81

ISBN 978-5-7883-0666-7

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2008

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие охватывает основные разделы дисциплин «Теоретические основы конструирования, технологии и надежности РЭС», «Основы проектирования электронных средств», «Моделирование процессов в РЭС», изучаемых студентами заочной формы обучения по специальности 210201.

Построение и изложение материала выполнено с учетом возможностей студентов заочной формы обучения. При написании учебного пособия авторы понимали, что при выполнении контрольных и курсовых работ студенты испытывают трудности: отсутствие рядом с работой технических библиотек, отдаленность университета и прерывистый режим обучения. Поэтому в учебном пособии материалы представлены по следующей структуре: краткое изложение теоретического материала, расчетные соотношения для выполнения лабораторных работ, примеры выполнения контрольных работ, указания к выполнению курсового проекта и, наконец, необходимые для расчета справочные материалы.

Цель пособия – дать комплекс знаний, который позволил бы студенту увидеть проблему создания надежных и конкурентоспособных электронных средств, а также показать, что грамотное конструирование изделия, с точки зрения надежности выполнения его функций, зависит от устойчивости конструкции к воздействию неблагоприятных факторов условий эксплуатации. Поскольку базой проектирования электронных средств являются радиоэлементы, обладающие ограниченной стойкостью к воздействию дестабилизирующих факторов, то студент должен иметь представление о возможных последствиях таких воздействий и знать методы их оценки и средства защиты.

1. СТРУКТУРА И КЛАССЫ ЭС

1.1. Уровни электронных средств

Развитие электроники оказывает существенное влияние на научно-технический прогресс и успехи в социально-экономической области. Машиностроение, которое играет ключевую роль в ускорении научно-технического прогресса, нуждается в надежно работающих сложных изделиях электроники, органически входящих в качестве комплектующих элементов в станки с числовым программным управлением, роботы и другие устройства гибких производственных систем. Транспорт, энергетика, космические системы и другие направления нашей экономики, где велики последствия одного единственного отказа, также нуждаются в высоконадежных изделиях электроники. Надежность этих изделий закладывается при их проектировании, обеспечивается при производстве и поддерживается при эксплуатации в составе ЭС. С другой стороны, изделия радиоэлектроники должны рассматриваться как результат разработки схемы, конструкции и технологии. Рассмотрим основные определения понятий и связанных с ними терминов. Исходными являются понятия радиоэлектроники и радиотехники. Радиоэлектроника - это область науки и техники, охватывающая широкий круг вопросов использования электромагнитной энергии для передачи, приема и преобразования сигналов и содержащейся в них информации.

Радиотехника - область науки и техники, связанная с генерированием, преобразованием, излучением и приемом электромагнитных колебаний и волн радиочастотного диапазона. В соответствии с международным регламентом границы радиочастот лежат в пределах 3 кГц...3 ГГц, которым соответствуют длины волн от 100 км до 0,1 мм. Кроме того, к электронике относят технику инфранизких частот, инфракрасную технику и оптоэлектронику. С технической стороны электроника также охватывает автоматику, техническую кибернетику, компьютерную технику.

Как отрасль промышленности радиотехника связана с разработкой, производством и применением радиоаппаратуры для радиосвязи, радиовещания, телевидения, радиолокации, радионавигации и других

направлений техники передачи информации. В более широком смысле вместо слова радиоаппаратура применяется термин электронные средства (ЭС), под которым подразумеваются приборы и технические устройства, предназначенные для преобразования электрических и электромагнитных сигналов с определенными целями. Наиболее общим названием изделий радиоэлектроники, рекомендованным в стандартах, является термин электронное средство, понимаемый как техническое изделие определенной сложности или его составная часть, в основу действия которого положены принципы радиотехники и электроники. По функциональной сложности ЭС разделяют на уровни: система, комплекс, устройство, узел, что отражено на рис.1.1. Собирательное понятие ЭС объединяет последние два уровня ЭС.

Радиоэлектронная система - это совокупность функционально взаимодействующих автономных радиоэлектронных комплексов и устройств, которые образуют целостное единство, обладающее свойством перестроения структуры в целях рационального выбора и использования входящих средств нижних уровней при решении технических задач. Примером может служить аэродромная автоматизированная система управления воздушным движением, которая производит измерения траекторных параметров самолетов и управление ими при полетах по кругу в районе аэродрома.

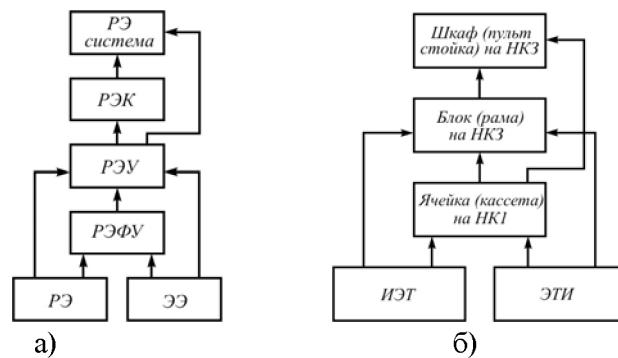


Рис. 1.1. Уровни разукрупнения ЭС:
 а - по функциональной сложности, б - по конструктивной сложности

В состав такой системы входят бортовой радиоэлектронный комплекс и наземные радиолокационный и вычислительный комплексы, которые, в свою очередь, состоят из радиоэлектронных устройств (РЭУ), т. е. ЭС более низкого уровня. Перестроение структуры данной системы вызывается условиями воздушной обстановки в районе аэродрома, в зависимости от интенсивности воздушного движения назначается оптимальная (с точки зрения безопасности) совокупность работающих ЭС.

В зависимости от сложности решаемых технических задач радиоэлектронная (РЭ) система может быть частью другой РЭ системы более высокого уровня.

Разновидностью РЭ системы является радиотехническая система, под которой понимают совокупность ЭС для передачи сообщений и команд по радиоканалам, состоящих из радиопередатчиков, линий радиосвязи и радиоприемников. Отличительным признаком как радиотехнической, так и вычислительной системы является возможность перестроения ее структуры с целью наиболее эффективного использования входящих в систему технических средств.

В составе любой РЭ системы могут присутствовать механические, электромеханические и другие средства, без которых невозможна ее эксплуатация. Эти средства могут входить в ЭС как отдельно, так и внутри радиоэлектронных комплексов или устройств.

Радиоэлектронный комплекс (РЭК) - это ЭС в виде совокупности функционально связанных РЭУ, обладающих свойством изменения структуры в целях сохранения работоспособности при выполнении технических задач в составе РЭ системы или в режиме самостоятельного применения. Примером РЭК может служить радиолокационный комплекс, состоящий из дальномера, высотомера и устройства опознавания и предназначенный для обнаружения объекта, определения его координат и установления принадлежности. При выходе из строя одного из устройств, входящих в комплекс, изменяются связи между ними, обеспечивая решение задачи при пониженной точности определения параметров объекта.

Радиоэлектронное устройство - есть ЭС в виде функционально законченной сборочной единицы, которая выполнена на несущей конструкции и реализует функции приема, преобразования и передачи информации. В зависимости от сложности решаемых задач РЭУ может быть частью другого РЭУ.

Примером РЭУ является метеонавигационный бортовой радиолокатор, который может быть выполнен на несущей конструкции в виде корпуса шкафа или блока. Данный радиолокатор предназначен для выполнения технической задачи по обнаружению с борта летательного аппарата опасных для полета гидрометеорологических образований и определению их углового положения и удаленности. Он состоит из совокупности функционально законченных сборочных единиц антенного, передающего и приемного устройств, а также устройств преобразования и отображения информации, каждое из которых также может быть отдельным примером РЭУ.

Функционально законченными сборочными единицами, входящими в радиомаяк, являются антенное и передающее устройства. Обычно радиомаяк конструируется в виде шкафа или блока.

Каждый из рассмотренных РЭУ может эксплуатироваться самостоятельно или в составе РЭК (РЭ системы). Любое РЭУ структурно разделяется на радиоэлектронные функциональные узлы, которые являются ЭС первого уровня, состоящие, в свою очередь, из элементов нулевого уровня функциональной иерархии: радиоэлементов (РЭ) и электротехнических элементов (ЭЭ) (рис. 1.1а).

Некоторые РЭ и ЭЭ могут входить непосредственно в РЭУ.

Радиоэлектронный функциональный узел (РЭФУ) - есть ЭС в виде законченной сборочной единицы, которая выполнена на несущей конструкции, реализует функции преобразования сигнала и не имеет самостоятельного эксплуатационного значения.

Примером РЭФУ являются усилитель, модулятор, источник вторичного электропитания и др. Первый узел выполняет функцию преобразования тока или напряжения по амплитуде без изменения их формы, второй - преобразования амплитуды либо частоты сигналов в соответствии с изменениями модулирующего напряжения, а третий -

преобразования переменного тока и напряжения в постоянные или постоянных одного значения в постоянные другого значения. Самостоятельного применения эти РЭФУ не имеют, а могут эксплуатироваться в составе РЭУ. В зависимости от технических характеристик указанные РЭФУ могут иметь конструктивное исполнение в виде радиоэлектронного шкафа, блока или ячейки.

По конструктивной сложности ЭС имеют четыре уровня иерархического деления, показанные на рис. 1.1б. Здесь нулевой уровень составляют изделия электронной техники (ИЭТ) и электротехнические изделия (ЭТИ). Они входят в радиоэлектронные ячейки или кассеты, выполненные на основе несущей конструкции первого уровня (НК1). На несущих конструкциях второго уровня (НК2) строятся радиоэлектронные блоки или рамы, которые могут включать в себя как ячейки (кассеты), так и ИЭТ с ЭТИ. Наконец, на несущих конструкциях третьего уровня (НК3) разрабатываются радиоэлектронные шкафы, пульта или стойки, в которые входят конструкции как второго, так и первого уровня.

Наличие двух видов классификации уровней разукрупнения (рис. 1.1а и 1.1б) свидетельствует о том, что в любом ЭС как готовом изделии различают две непосредственно взаимосвязанные части: электрическую схему и конструкцию.

Электрическая схема ЭС - есть совокупность РЭ, соединенных между собой в соответствии с заданным принципом действия РЭ системы или в соответствии с функциями, выполняемыми данным ЭС внутри другого ЭС более высокого уровня. Иными словами, электрическая схема отображает те преобразования полезных сигналов и помех, которые происходят с ними при прохождении через ЭС.

Схемотехника - прикладная научная дисциплина, занимающаяся анализом и синтезом электрических схем ЭС. Теоретическим фундаментом схемотехники является радиотехника.

Конструкция ЭС - есть совокупность ИЭТ, ЭТИ и конструктивных деталей, находящихся в определенной пространственно-механической, информационной и энергетической взаимосвязи, кото-

рая обеспечивает выполнение данным ЭС необходимых функций с высокой надежностью.

Надежность - это свойство ЭС сохранять во времени в установленных пределах значения всех требуемых характеристик, параметров и показателей при заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки.

Различают два понимания термина «конструирование». Конструирование ЭС как вид инженерной деятельности есть совокупность работ, выполняемых при создании проекта конструкции аппаратуры. Конструирование ЭС как прикладная научная дисциплина - это обобщение методов анализа и синтеза конструкций. Теоретический фундамент конструирования ЭС составляют: системный анализ, математическое моделирование, исследование операций, планирование эксперимента, теория вероятностей и математическая статистика, теория надежности, теория оптимизации и другие научные направления. В настоящее время на основе этих фундаментальных направлений формируется самостоятельная теория конструирования ЭС как система научных принципов и общих закономерностей разработки конструкций в электронике.

1.2. Классификация электронных средств

Электронные средства удобно классифицировать по следующим признакам: виду аппаратуры, области ее применения, способу конструктивного выполнения, принципу действия, назначению и элементной базе.

В соответствии с перечисленными признаками классификация ЭС представлена на рис. 1.2 (направление связей между признаками указано стрелками). Приведенная классификация достаточно укрупненная, но она позволяет выделить главные отличительные признаки ЭС различных видов.

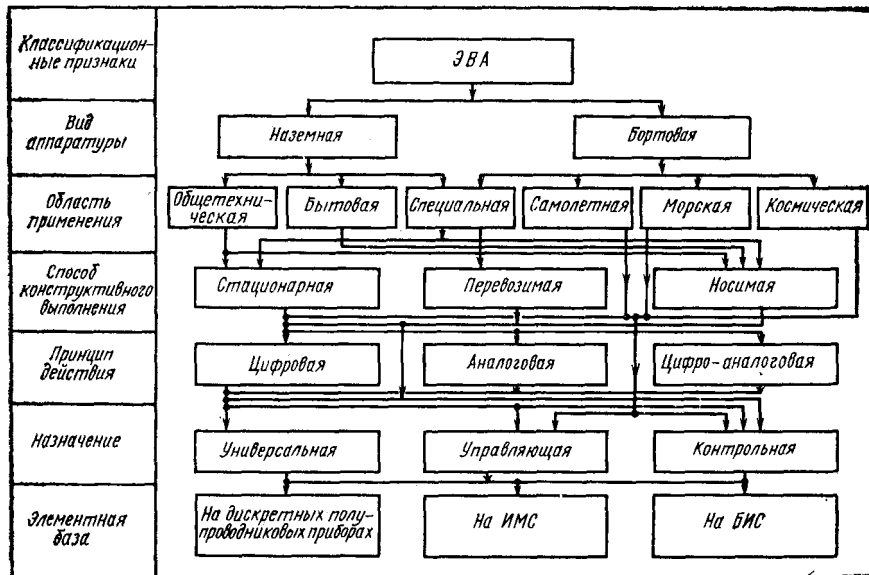


Рис. 1.2. Классификация ЭС

Пользоваться классификацией следует таким образом. Пусть, например, необходимо знать основные характеристики переносной ЭС общетехнического назначения. Из классификационной схемы следует, что такая аппаратура может быть только наземной, конструктивно оформляться в переносном варианте, она может быть создана преимущественно на цифровом принципе, иметь универсальное или контрольное назначение и быть выполненной на любой элементной базе.

1.3. Типовые конструкции электронных средств

В зависимости от степени сложности типовые конструкции (ТК) можно разделить на три конструктивных уровня: I - элементная база (конструктивно и технологически неделимая совокупность материалов), II - типовые компоненты (совокупность ТК I уровня и электрических и механических элементов, имеющая самостоятельное функциональное назначение), III - конструкция ЭС в целом (совокупность схемно- и конструктивно-технологически законченных изделий).

Конструкции несущих элементов ТК строят по принципу входимости корпусов (модулей) одного уровня (младшего) в корпуса (модули) другого уровня (старшего) за счет сочетания условных рам, построенных в прямоугольных координатах. Внешняя граница этих рам определяется внутренними размерами рам старшего уровня, а внутренняя - размерами рам младшего уровня. Поэтому можно строить новые корпуса, комбинируя условные рамы. Для частичного блока рамы, установленные с передней и задней сторон, соединяют одной или несколькими рамами уз. В комплектном блоке соединение осуществляют рамой ху. Для стойки характерна одна рама уз, а пульт чаще всего состоит из рам ху и хз. Некоторые стороны рам не воплощают в материале, а другие могут развиваться, превращая раму в объемную конструкцию.

Согласно принципу структурной иерархии элементы низших уровней входят в элементы верхних, в некоторых вариантах возможны переходные конструкции.

В конкретных разработках могут быть отклонения от размеров принятого модуля, так как существуют два способа назначения размеров на каркасы блоков и лицевых панелей. В первом способе номинальный размер лицевой панели выбирают, как правило, из ряда предпочтительных чисел. При установке в корпусе рядом двух блоков зазор между ними получается за счет допусков по системе вала. Во втором способе расстояние между блоками увеличивают введением нормированного зазора по широкоходовой посадке и уменьшают номинальный размер панели. Точность изготовления деталей при этом одинакова (рис. 1.3).

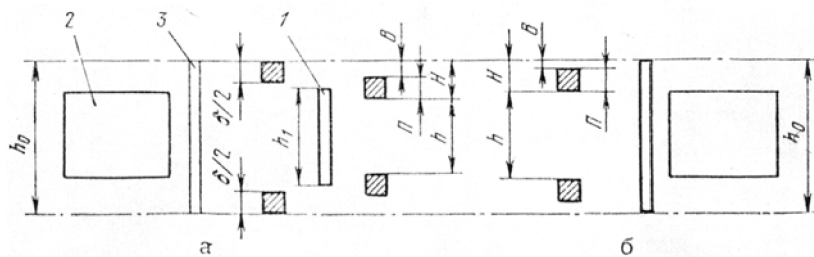


Рис.1.3. Схема полей допусков при системе вала (а) и широкоходовой посадке (б): h_0 - расчетный размер, h_1 - минимальный размер, h - номинал с полем допуска $\Pi=H-V$

При разработке размерной системы необходимо не только обеспечить преемственность конструкции, но и найти оптимальную композицию изделия, уточнить внешний вид, выявить главные элементы композиции. В процессе разработки композиции изделие перестает быть механическим соединением модулей и приобретает заверченный характер. Модульная координация размеров должна обеспечивать не только простую соизмеримость входящих в систему числовых значений, но и строиться с учетом антропометрии, устанавливающей основные статические и динамические характеристики рабочей позы оператора в положении «сидя» и «стоя».

Стандартизация конструкций ЭС, развитие модульной техники, ограничение рядов типоразмеров компонентов конструкций, ориентация на современные методы конструирования, достижения микроэлектроники и прогрессивные технологические процессы позволили создать единую конструктивную базу ЭС - комплекс универсальных типовых конструкций (УТК), совместимый с автоматизированными методами проектирования и изготовления ЭС.

Комплекс УТК в зависимости от условий эксплуатации и конструктивно-технологических особенностей ЭС, в которой применяются эти конструкции, можно подразделить на следующие три класса:

- УТК-I — стационарная ЭС, предназначенная для работы в отапливаемых и неотапливаемых помещениях (категории 3 и 4 по ГОСТ 15150—69),

- УТК-II — стационарная, полустационарная и подвижная ЭС, работающая на открытом воздухе, во временных помещениях и укрытиях, палатках, на колесном и гусеничном транспорте (категории I и 2 по ГОСТ 15150—69 и 4 и 6 по ГОСТ 16019-78),

- УТК-III — ЭС, устанавливаемая на подвижных объектах в труднодоступных местах и работающая на ходу в жестких условиях эксплуатации. Таким образом, каждый класс УТК предназначен для ЭС, работающей в одинаковых или сходных условиях эксплуатации.

Состав комплекса УТК. Комплекс УТК построен по иерархическому принципу и включает компоненты пяти конструктивных уровней (КУ):

- КУ-0 - бескорпусные активные и пассивные микроэлементы в виде полупроводниковых транзисторов, диодов, диодных матриц, интегральных схем различной степени интеграции, пленочных резисторов и конденсаторов (табл. 1.1),

- КУ-1 - корпусные резисторы, конденсаторы, полупроводниковые приборы, ИС широкого применения, реле, элементы сигнализации и индикации, гибридные ИС частного применения, МУ средней и большей степени интеграции;

Таблица 1.1. Бескорпусная элементная база

Тип элемента	Размеры кристалла $l \times b \times h$	Монтажная площадь, мм ²	Выходы
Интегральные микросхемы			
Серия 129	1,7×1,2×0,8	5,3	6-П
Серия 703	1,8×1,8×0,8	3,24	14-Ш
Серия 734	1,8×1,8×0,8	13,8	14-П
Серия 756	1,6×1,6×0,8	2,56	14-Ш
Серия 775	1,5×1,5×0,8	2,25	8-Ш
Транзисторы			
2Т202	1×1×0,8	3,3	3-П
2Т317	1×1×0,8	2,8	3-П
2Т377	2×2×0,8	11,3	3-П
2Т381	1×1×0,8	2,8	3-П
Диоды и диодные матрицы			
2Д901	1,2×1,2×0,8	4,8	3-П
2Д907	1×1×0,8	7,4	4-П
2Д917	1×1×0,8	7,4	4-П
Конденсаторы			
КТП-1	2,2×2,2×0,6	9,7	2-П
КТП-2	3,5×3,5×0,6	20,2	2-П
Резисторы			
РТП	1×2×0,6	4,3	2-П

Примечание. Цифры обозначают число выводов, буквы — конструкцию: П — проволочные, Ш — шариковые.

- КУ-2 - унифицированные печатные платы. Для ЭС, разрабатываемой на базе УТК-1 и УТК-11, ТЭК для ЭС, разрабатываемой на базе УТК-111;

- КУ-3 - частичные вставные блоки, комплектные блоки, блочные каркасы для ЭС, разрабатываемой на базе УТК-1 и УТК-11, и несущие конструкции малогабаритных блоков для ЭС, разрабатываемой на базе УТК-III;

- КУ-4 - несущие конструкции стоек, шкафов, пультов управления, распределительных щитов, приборных корпусов для ЭС, разрабатываемой на базе УТК-1 и УТК-II, и несущие конструкции агрегатированных систем и подсистем малогабаритной и микроминиатюрной ЭС, разрабатываемой на базе УТК-III.

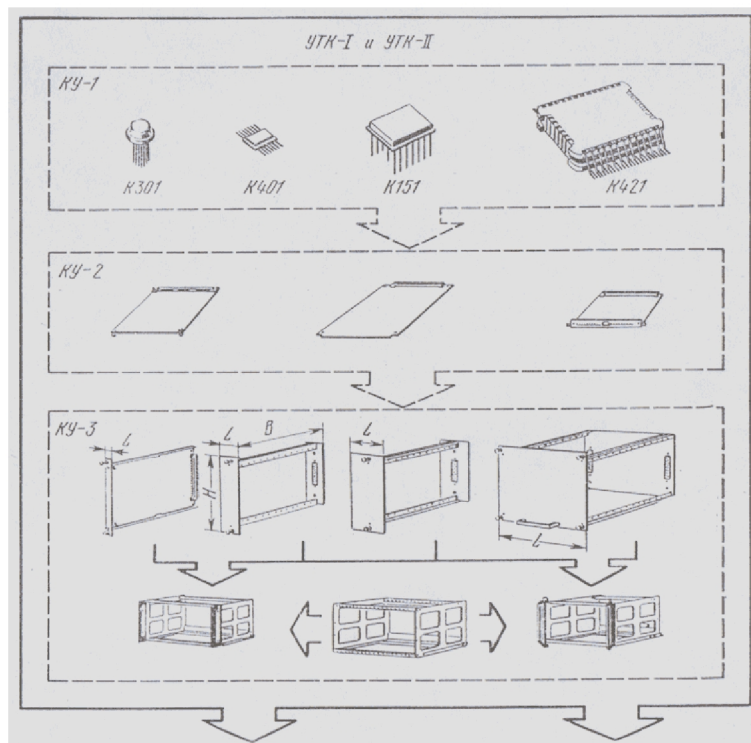


Рис. 1.4. Структура УТК

Каждый уровень объединяет конструкции одинаковой сложности, причем компоненты высших КУ включают в себя сочетания компонентов низших КУ.

Классы УТК-I и УТК-II имеют единую номенклатуру и общее конструктивное исполнение компонентов, что обеспечивает преемственность и взаимозаменяемость конструкций на уровне печатного узла и частичного блока (рис. 1.4).

Разделение комплекса УТК на пять конструктивных уровней вместо трех обусловлено необходимостью выделить ряд компонентов в самостоятельные группы, что не противоречит общепринятому в справочнике подходу, так как нулевой и первый уровни представляют первый уровень конструкций ЭС, второй и третий уровни УТК- компоненты второго общепринятого уровня, а компоненты четвертого уровня УТК являются одновременно компонентами третьего уровня конструкции ЭС.

2. ВНЕШНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА

2.1. Влияние субъективных и объективных факторов на работоспособность ЭС

Повреждения радиодеталей и радиокомпонентов могут быть обусловлены неправильным конструированием, нарушениями ТУ при производстве и условиями эксплуатации. Все многообразие дестабилизирующих факторов условно разделяют на две большие категории: субъективные и объективные факторы.

Субъективные факторы. Эта категория факторов определяется действиями отдельных людей, оказывающих существенное влияние на надежность изделий на всех этапах, начиная от конструирования и изготовления и кончая их эксплуатацией. Однако степень влияния субъективных факторов на работоспособность радиодеталей и радиокомпонентов различна для различных этапов их изготовления. Ошибки, допущенные при конструировании, исправляются, как правило, усилиями всего коллектива. Ошибки, допущенные при изготовлении, выявляются

во время многочисленных испытаний. Ошибка же одного эксплуатационщика может оказать решающее влияние на работоспособность радиодеталей и радиокомпонентов, на их готовность к выполнению основной задачи. Поэтому в основе значительной доли отказов радиодеталей и радиокомпонентов лежат неправильные действия обслуживающего персонала во время контроля функционирования, регулировки, ремонта и эксплуатации ЭС[3].

Основные субъективные факторы могут быть сведены к следующим:

- небрежность в обращении с радиодетальями и радиокомпонентами при их производстве и эксплуатации;
- отсутствие необходимых знаний и опыта, определяющих правильные действия в условиях эксплуатации (при выборе режимов работы, контроле функционирования, регулировке и ремонте).

Несоблюдение инструкции по эксплуатации, нарушение объема и методики профилактических или ремонтных работ, связанных с предупреждением неисправностей, приводят к ускорению износа радиодеталей и радиокомпонентов, а также и ЭС в целом. Небрежно составленная инструкция по эксплуатации также может быть причиной повреждения радиодеталей и радиокомпонентов.

Установлено, что из общего количества повреждений ЭС примерно 43% происходит от ошибок при конструировании, 20% зависят от изготовления радиодеталей и радиокомпонентов и ЭС, 30% относятся к условиям эксплуатации, а остальные 7% определяются износом, старением и недоброкачественным сырьем. Причем неправильный режим эксплуатации, неправильное и неумелое обслуживание дает около 18% повреждений.

Объективные факторы. Эти факторы связаны с внешними воздействиями на радиодетали и радиокомпоненты, с особенностями их применения, с внутренними процессами в материалах, определяющими износ и старение. Известно, что изделия из одних и тех же материалов в одних условиях эксплуатации и хранения не теряют работоспособности несколько десятков или даже сотен лет, в других - разрушаются в течение нескольких дней. Следовательно, в изделиях могут происходить те или иные процессы, с различной скоростью изменяющие их

свойства. Знание этих процессов и степени влияния объективных факторов на их ход дает возможность принять меры для замедления или полного устранения их. Это позволяет на многие годы сохранить работоспособность радиодеталей и радиокомпонентов. К объективным факторам относят климатические, механические и температурные воздействия.

2.2. Влияние температуры на работоспособность ЭС

Температурные воздействия являются одним из наиболее активных дестабилизирующих факторов. Повышение или понижение температуры почти всегда вызывает ухудшение работы ЭС, так как изменение температуры даже в формально допустимых пределах вызывает изменение параметров радиодеталей и радиокомпонентов. Это связано с изменением физических и химических свойств материалов, из которых изготовлены радиодетали и радиокомпоненты. Изменение температуры вызывает появление деформаций, изменение твердости и упругости, электрических и магнитных свойств материалов. При этом могут произойти недопустимые изменения параметров радиодеталей и радиокомпонентов или их разрушение.

Температурная деформация материалов и конструкций. Все материалы при изменении температуры в некоторой степени претерпевают деформацию, величина которой зависит от их физических свойств и характера воздействия температуры.

Изменение линейных размеров однородного тела Δl определяется известной зависимостью

$$\Delta l = \alpha l (t_2 - t_1), \quad (2.1)$$

где α - температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР); t_2 и t_1 - конечная и начальная температуры соответственно; l - линейный размер тела, например, его длина.

Из уравнения (2.1) видно, что на деформацию тела в одинаковой степени оказывает влияние как температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), так и разность температур. Если конструкция однородна и у всех ее частей температура изменилась на одну и ту же величину, то внутренних напряжений в ней не возникает - форма конструкции не искажается. Если же температура отдельных частей

однородной конструкции не одинаковая, то она деформируется. В конструкции, состоящей из двух или более элементов, при изменении температуры геометрические размеры элементов изменяются не в одинаковой степени. Это приводит к деформации конструкции. Причем деформация конструкции тем больше, чем больше разница температур в отдельных ее частях и чем больше различаются ТКЛР ее элементов.

На величину деформации конструкции сильное влияние оказывает теплопроводность материалов. При нагреве части конструкции, обладающие лучшей теплопроводностью, будут нагреваться быстрее и их температура будет выше температуры других частей. При охлаждении же эти части будут охлаждаться быстрее и их температура будет ниже, чем у других частей, обладающих худшей теплопроводностью. Таким образом, материалы с плохой теплопроводностью способствуют получению больших деформаций, обусловленных большой разностью температур отдельных частей конструкции.

Деформация неоднородной конструкции, состоящей из нескольких связанных между собой элементов с различными ТКЛР, может значительно отличаться от подсчитанной по формуле (2.1) и достигать больших или очень малых значений. Это говорит о том, что путем продуманного подбора материала элементов конструкции (с учетом их ТКЛР и теплопроводности) можно создавать радио-детали и радиокомпоненты, не подвергающиеся разрушительным деформациям.

У большинства материалов, используемых в радиодеталях и радиокомпонентах, величина α находится в пределах $(1...300) \cdot 10^{-6}$. У металлов α находится в пределах $(1...40) \cdot 10^{-6}$, у неорганических диэлектриков (керамика, стекло, кварц, слюда и др.) α , как правило, не превышает $10 \cdot 10^{-6}$. Наибольшее значение α , достигающее до $300 \cdot 10^{-6}$, имеют различные органические диэлектрики.

Различие ТКЛР например у металлов и пластмасс, приводит к образованию каналов между этими материалами. Эти каналы создают пути для проникновения влаги. При низкой температуре вода замерзает и, расширяясь примерно на 10% в объеме, вызывает дальнейшее увеличение каналов, трещин, зазоров. При действии тепла и холода на припой, скрепляющий одну деталь с другой, в нем могут возникнуть такие усилия, которые нарушат связь припоя с материалом. В результате мо-

жет нарушиться герметизация радиодетали или радиокомпонента, а также и электрический контакт. Разница в ТКЛР различных материалов может вызвать деформацию узлов в сборе, разрыв уплотняющих элементов и заедание движущихся частей.

Влияние температуры на свойства материалов. Температурные воздействия оказывают заметное влияние на свойства материалов. Так, например, при повышении температуры увеличивается электрическое сопротивление металлов и сплавов. При температуре от 200 до 500°C заметным становится уменьшение модуля упругости и предела прочности материалов. При понижении температуры у всех материалов понижается пластичность, а при достаточно низких температурах пластичность практически исчезает и материалы становятся хрупкими.

От температуры в значительной степени зависят электрические свойства диэлектриков. При повышении температуры сопротивление изоляции резко падает, растут диэлектрические потери, изменяется диэлектрическая проницаемость, некоторые диэлектрики размягчаются. Электрическая прочность большинства диэлектриков при действии тепла вначале увеличивается, а механическая прочность уменьшается вследствие удаления влаги. Затем начинается уменьшение электрической прочности. Конечным результатом является физическое разрушение диэлектрика. Изоляционные материалы под действием тепла и холода растрескиваются, что способствует усиленному проникновению влаги и потере диэлектрических свойств.

Под старением понимают явления, связанные с изменением электрических и физических свойств материалов при длительном воздействии окружающей среды. Больше всего подвержены старению органические изоляционные материалы: повышение рабочей температуры на каждые 8...10°C вдвое сокращает их срок службы. Воздействие времени и температуры уменьшает механическую прочность органических материалов. Они становятся более хрупкими и в конечном счете могут быть разрушены под действием даже небольшого удара или вибрации.

В металлических конструкциях старение проявляется в постепенном исчезновении внутренних напряжений, образовавшихся при

изготовлении. В итоге заданная форма конструкции может в значительной степени изменяться (деформироваться).

Температура нагрева трансформаторов при эксплуатации повышается вследствие потерь в обмотках и железе и меняется в широких пределах. Из-за различия ТКЛР примененных материалов изменяются геометрические размеры всего трансформатора и, в частности, его обмоток. Витки обмоток смещаются один относительно другого, а это приводит к появлению короткозамкнутых витков. Трансформаторы нагреваются во время работы или при повышении температуры окружающей среды, а при выключении аппаратуры охлаждаются. При нагреве заливочный материал трансформаторов расширяется, при охлаждении сжимается. Это приводит к образованию внутри заливочной массы вакуумных или воздушных включений, которые постепенно перемещаются вверх. В том случае, когда на верхней части кожуха трансформатора расположена клеммная плата и кожух негерметичен, влага, проникающая в кожух, приводит к электрическому пробоем платы.

При колебаниях температуры в катушках индуктивности возникают деформации, приводящие к изменению их индуктивности. Повышение температуры катушек реле вызывает увеличение их сопротивления. Это в некоторых случаях приводит к уменьшению тока в обмотках до величины, недостаточной для четкого срабатывания реле. При нагревании катушек реле летучие продукты лаков и компаундов, осаждаваясь на поверхности контактов, нарушают контакты, что ведет к нечеткому срабатыванию реле.

Наиболее чувствительны к изменению температуры полупроводниковые приборы. Например, для германиевых транзисторов обратный ток через коллекторный переход I_{co} с увеличением температуры увеличивается примерно в 2 раза на каждые 10°C . Температурная зависимость параметров полупроводниковых приборов является одним из наиболее важных факторов, ограничивающих возможность их использования. В прямой зависимости от температуры находится и их срок службы.

Микромодули широкого применения могут работать в интервале температур от -60 до $+70^{\circ}\text{C}$. Длительное воздействие высоких температур, близких к предельным, в некоторых случаях приводит к необ-

ратимым изменениям электрических параметров микромодулей. Отрицательные температуры оказывают меньшее влияние на старение большинства материалов, но сильнее влияют на изменение параметров микромодулей, чем положительные. Кроме изменения электрических параметров, при переменном воздействии отрицательных и положительных температур в ряде случаев могут наблюдаться разрушения отдельных элементов конструкции микромодулей.

Основными параметрами, от которых зависит работоспособность печатных плат, являются сопротивление изоляции, тангенс угла диэлектрических потерь и диэлектрическая проницаемость. С увеличением температуры уменьшается сопротивление изоляции печатных плат, возрастают тангенс угла диэлектрических потерь и паразитная емкость. Это приводит к увеличению уровня потерь и ухудшению стабильности работы. Воздействие температур приводит к старению материалов, используемых для изготовления печатных плат и, следовательно, к необратимому изменению их основных параметров.

2.3. Влияние атмосферного давления на работоспособность электронных средств

Радиодеталям и радиокомпонентам авиационных и космических ЭС часто приходится работать при очень высоких или очень низких атмосферных давлениях. Низкое атмосферное давление характерно для условий работы на большой высоте. С понижением атмосферного давления уменьшается электрическая прочность воздуха.

С уменьшением атмосферного давления увеличивается опасность возникновения газовых пробоев (разрядов), образующихся благодаря ионизации воздуха. Пробой начинается с коронного разряда. Коронный разряд в атмосфере, содержащей кислород, сопровождается выделением высокореактивного оксидирующего газа - озона и некоторых агрессивных азотных соединений. В присутствии влаги из этих соединений образуются азотистая и азотная кислоты, вызывающие коррозию металлов и повреждение изоляции. Корона вызывает повреждение изоляции и коррозию металлов: высокие температуры, возникающие вследствие действия короны, ускоряют процесс старения изоляции.

Пробивное напряжение U_{np} газового промежутка является функцией давления газа p и расстояния d между электродами:

$$U_{np} = f(p, d).$$

На рис.2.1 приведена зависимость напряжения пробоя газового изоляционного промежутка между плоскими электродами от произведения длины промежутка d на величину атмосферного давления p .

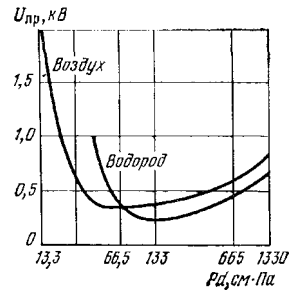


Рис. 2.1. Зависимость напряжения пробоя U_{np} от произведения pd

Из графиков видно, что при уменьшении давления электрическая прочность газовых изоляционных промежутков вначале снижается, а затем, достигнув минимума при некотором давлении, снова растет.

Появление коронного разряда наиболее вероятно между электродами, имеющими острые углы. Поэтому при конструировании следует помнить, что острые углы у радиодеталей и радиокомпонентов нежелательны. Увеличение электрической прочности воздушных промежутков между токоведущими частями путем увеличения расстояния между ними с уменьшением давления становится все менее и менее эффективным.

При пониженном атмосферном давлении теплопроводность воздуха уменьшается, следовательно отвод тепла от радиодеталей и радиокомпонентов ухудшается. С изменением атмосферного давления изменяется и диэлектрическая проницаемость воздуха, что вызывает, например, изменение емкости воздушных конденсаторов. Снижение атмосферного давления, кроме того, может вызвать дополнительные механические нагрузки, в особенности на кожухи герметичных элементов и уплотненных (элементов не герметичных, но с использованием

уплотнительных прокладок или опрессовки). При понижении давления окружающей атмосферы стенки корпуса герметичных элементов испытывают воздействие перепада давления. Усилия, возникающие при этом, достигают больших значений. Если в конструкции элемента не приняты специальные меры (например, установка клапана, создание «слабого места»), снижение атмосферного давления ведет к деформации или даже разрушению корпуса.

Если элементы не герметизированы, то при резком понижении давления возможно «вскипание» имеющихся в них жидкостей. Это происходит из-за быстрого выделения при атмосферном давлении растворенных в жидкостях газов.

2.4. Влияние влаги на работоспособность ЭС

Изменение свойств материалов обычно возрастает, если одновременно действуют два или более возмущающих факторов. Например холод, периодически чередующийся с положительной температурой (зона пустынь, где дневная жара сменяется заморозками), вызывает конденсацию влаги на поверхности радиодеталей и радиокомпонентов.

При низкой температуре вода в порах и трещинах замерзает и, расширяясь, вызывает их увеличение, при высоких температурах влага, испаряясь, также вызывает их увеличение. В итоге может произойти разрушение поверхности тела или его покрытия.

Влага ускоряет коррозию металлов, изменяет электрические характеристики диэлектриков, способствует тепловому распаду материалов и росту плесени. Все тела, даже при нормальной относительной влажности атмосферы (65%), покрыты тончайшей (0,001... 0,01 мкм) пленкой воды. Эта пленка ионизируется окисью углерода атмосферы, солнечным светом и солями. Ионизация увеличивает ее проводимость. Если поместить образец материала с очень малым объемным поглощением воды в атмосферу, имеющую 100%-ную относительную влажность при нормальной температуре, на нем в течение нескольких секунд образуется ионизированная проводящая пленка. Образование пленок на поверхностях изоляционных материалов уменьшает их поверхностное сопротивление, а проникновение влаги внутрь материала уменьшает объемное сопротивление. Причем степень изменения со-

противления изоляции зависит от влажности и температуры, от способности материала диэлектрика впитывать влагу и загрязненности его поверхности.

Влага в атмосфере содержит не только пары воды, но и растворы солей и кислот. Осаждаясь на поверхности металла, влага образует пленку электролита. Возникающая при этом химическая реакция приводит к быстрому разрушению поверхности металла - коррозии. Коррозия уменьшает механическую прочность металла, вызывает нарушение контактов или обрыв тонких проводов. В керамических негерметизированных конденсаторах в условиях тропического климата наблюдается заметное уменьшение сопротивления изоляции и емкости, а тангенс угла диэлектрических потерь при этом увеличивается в 2...3 раза. Чрезмерное проникновение влаги в электролитические конденсаторы с плохим уплотнением приводит к изменению емкости, тока утечки и снижению удельного сопротивления электролита и тангенса угла диэлектрических потерь. При этом с течением времени возрастает проводимость, что приводит к нарушению теплового равновесия конденсатора и он выходит из строя.

При поглощении диэлектриком более чем 0,1% воды от его массы параметры большинства типов конденсаторов выходят за пределы допустимого. В негерметизированных конденсаторах, спрессованных в пластмассу или залитых компаундом, снижается сопротивление изоляции и увеличивается тангенс угла диэлектрических потерь. Возрастает также вероятность пробоя конденсаторов. Сопротивление изоляции конденсатора с диэлектриком из слюды, включающим небольшое количество влаги, резко уменьшается при нагреве конденсатора до 80°C, при этом значительно возрастает тангенс угла диэлектрических потерь.

Для предотвращения проникновения влаги в область проводящего слоя непроволочные резисторы покрывают несколькими слоями (3... 4) лака или эмали с последующей сушкой каждого слоя. Для сильно нагруженных резисторов используют кремнийорганическую эмаль. На поверхности резисторов недопустимы дефекты, нарушающие целостность эмалевого или лакового покрытия. Незаметные на первый взгляд раковины, пузырьки воздуха или точечные наколы защитного

слоя являются причиной возникновения каналов, по которым к токопроводящему слою проникает влага. Повреждения защитного слоя нередко возникают в результате небрежного обращения с резисторами.

Из наиболее часто встречающихся повреждений постоянных и переменных проволочных резисторов, вызванных действием влаги, являются обрывы проволоки, нарушение контакта проволоки с выводом, нарушение контакта между движком и контактной дорожкой.

У трансформаторов, дросселей и катушек индуктивности влага, попавшая внутрь обмоток, снижает сопротивление изоляции между витками до такой величины, при которой появляются значительные утечки, облегчающие пробой изоляции и образование короткозамкнутых витков. В катушках индуктивности под действием высокой влажности наблюдается снижение добротности на 10 ... 40%.

В печатных платах между токоведущими частями схемы с разными потенциалами возникают токи утечки, шунтирующие электрические цепи. С повышением влажности воздуха вероятность возникновения шунтов и поверхностного перекрытия сильно возрастает. Продолжительное нахождение печатных плат в условиях повышенной влажности приводит к возникновению необратимых явлений, вызывающих резкое уменьшение сопротивления изоляции. Покрытие печатных схем влагозащитными лаками, герметизация, заливка компаундами повышают их долговечность и стабильность работы.

2.5. Влияние механических воздействий на работоспособность ЭС

При эксплуатации ЭС могут возникнуть воздействия механического характера в виде ударов, линейных ускорений, вибраций, а также опасные механические воздействия, связанные с отгрузкой и транспортированием радиодеталей и радиокомпонентов к месту назначения в упаковке или в составе ЭС. Вибрации, линейные ускорения и удары могут вызвать как механические повреждения, так и изменение электрических параметров радиодеталей и радиокомпонентов.

На основе анализа воздействий механических нагрузок и напряжений можно выделить шесть основных причин, вызывающих механические повреждения радиодеталей и радиокомпонентов или изме-

нение их электрических параметров: статический отказ, хрупкий излом, нестабильность конструкции, ползучесть и усталость материала, коррозия.

Статический отказ - это поломка или полное разрушение радиодетали и радиокомпонента, или их деформация сверх допустимых пределов во время единичного приложения постепенно нарастающей нагрузки. *Хрупкий излом* также возникает в условиях статической нагрузки, но в отличие от статического отказа характерен внезапностью наступления. Хрупкий излом в пластичном материале может возникнуть при наличии дефектов в сильно напряженных участках. Механические повреждения и изменения электрических параметров радиодеталей и радиокомпонентов за счет *ползучести* и *усталости* материалов относятся к явлениям, зависящим от времени, так как деформации этого типа увеличиваются со временем.

Механические повреждения, связанные с *нестабильностью конструкции*, вызываются скачкообразным увеличением деформации элемента конструкции при достижении нагрузкой критического значения. Причиной механических повреждений и изменений электрических параметров радиодеталей и радиокомпонентов часто является *коррозия*. Коррозия уменьшает прочность конструкции, причем она протекает быстрее у материалов, которые находятся под механическим напряжением.

Перечисленные причины механических повреждений радиодеталей и радиокомпонентов и изменений их электрических параметров редко возникают отдельно одна от другой (в чистом виде). Обычно они действуют в сочетании.

Механические воздействия, особенно ударные, могут вызвать различные поломки, которые приводят к отказу ЭС. У крупных радиодеталей и радиокомпонентов, например трансформаторов, дросселей низкой частоты, больших конденсаторов и т. д., под влиянием ударов создается опасность поломки креплений, а для керамических и других хрупких деталей - опасность их растрескивания. В результате механических воздействий возможно нарушение плохих паяк, появление трещин и сколов на поверхности остеклованных резисторов, растрескива-

ние и отслаивание лакокрасочных покрытий, нарушение контактов реле и переключателей, обрыв тонких проводов и т. п.

Вибрации могут привести к самоотвинчиванию винтов и гаек креплений, облому выводов радиодеталей и радиокомпонентов, замыканию проводов с поврежденной изоляцией. Вибрации и конструктивные особенности элемента будут ослаблять высокочастотное возбуждение до того момента, как оно дойдет до деталей элемента. Акустический же шум возбуждает корпус радиодетали или радиокомпонента и их каждую деталь с помощью распределенного усиления, являющегося функцией уровня звукового давления и площади каждой детали элемента.

Для уменьшения влияния акустического шума опорные элементы конструкций и кожухи элементов и ЭС изготавливают из материалов, имеющих высокие демпфирующие свойства. Все малогабаритные радиодетали должны иметь жесткое крепление. Уменьшение числа объемных проводников достигается использованием многослойного печатного монтажа. Хорошие результаты по уменьшению интенсивности воздействия акустического шума дает заливка компаундами отдельных групп элементов.

В процессе эксплуатации на объектах-носителях и при транспортировании конструкции ЭС подвергаются воздействию внутренних и внешних механических сил. Внутренние силы возникают вследствие работы механизмов внутри самих ЭС, чаще всего за счет эксцентриситета вращающихся узлов, например якоря электродвигателя, вызывая «силовое» механическое возбуждение конструкции ЭС. Воздействие внешних сил передается от объекта-носителя на ЭС через точки их крепления, вызывая «кинематическое» возбуждение.

К внешним воздействиям относят гармонические, полигармонические и случайные вибрации, однократные и многократные удары, линейное ускорение и акустический шум. Каждый вид воздействия характеризуется совокупностью кинематических параметров и их типовыми значениями для реальных объектов-носителей ЭС. Последствия воздействий характеризуются динамическим параметром — силой F , действующей на элемент ЭС массой m , и моментом этой силы M_F или

механическим напряжением s , возникающим при деформации конструкции.

Так, воздействие гармонической вибрации задается законом колебаний

$$z = A_B \sin(2\pi ft)$$

с параметрами A_B (амплитуда колебания) и f (частота), а воздействие случайной вибрации - функцией автокорреляции возмущающего случайного процесса

$$R_z(\tau) = \sigma_z^2 r_z(\tau)$$

с параметром σ_z . Ударное воздействие задается формой ударного импульса, т. е. законом изменения ускорения $a(t)$ (прямоугольной, треугольной, полусинусоидальной и другой формы), его амплитудой A_H и длительностью τ_u . Влияние линейного ускорения a_n , действующего в поле силы тяжести, задается собственно его значением; этот вид воздействия практически ослаблению не поддается.

Акустическое воздействие задается уровнем интенсивности звука

$$I = 10 \lg(E/E_0),$$

где E - интенсивность звука, создаваемого источником (например реактивными двигателями самолетов и ракет); $E_0 = 10^{-12}$ Вт/м². Создаваемые источником акустического шума перепады давлений $\Delta p = \sqrt{E\rho c}$ (где ρ - плотность воздуха; c — скорость звука в воздухе), достигающие 20 % от нормального атмосферного давления, представляют опасность для герметичных блоков.

Применительно к конкретным условиям эксплуатации и выполняемым функциям различают:

вибро- и ударопрочные ЭС, способные сохранять свои параметры в пределах установленных норм до подачи и после снятия механических воздействий;

вибро- и удароустойчивые ЭС, способные сохранять свои параметры в пределах установленных норм, в том числе и во время механических воздействий.

Примером вибро- и ударопрочных ЭС является аппаратура, устанавливаемая на космических летательных аппаратах, функциониру-

вание которой начинается только после выведения их на расчетную орбиту. При этом требования по вибро- и ударопрочности распространяются лишь на кратковременный период активного участка полета.

Примером вибро- и удароустойчивых ЭС является аппаратура, устанавливаемая на подвижных объектах длительного действия, — автомобилях, самолетах, вертолетах. Для этих ЭС требования вибро- и удароустойчивости распространяются на весь период их эксплуатации.

В результате механических воздействий в конструкциях ЭС происходят обратимые и необратимые изменения.

Обратимые изменения связаны с временным нарушением устойчивости функционирования и проявляются в виде «виброшумов», возникающих в ЭРК, конструкциях ЭС и их монтажных соединениях. Изменение геометрических размеров элементов приводит к возникновению паразитной модуляции их параметров (емкости, индуктивности, проводимости). Нарушение электрического контакта в разъемных и неразъемных соединениях и реле вызывает явление «дребезга» электрических сигналов, появление наводок и изменение параметров электрических и магнитных полей.

Необратимые изменения связаны с нарушением целостности конструкций ЭС из-за превышения пределов прочности их материалов для различных видов деформаций и возникновения явления усталости материалов, связанного с накоплением микрповреждений под воздействием многократных знакопеременных механических напряжений σ . В наибольшей степени явлению усталости подвержены цветные металлы, которые в отличие от стали не имеют вырожденного предела усталости $\sigma_{выр}$ (кривые Веллера) и их прочность снижается по мере увеличения числа циклов N знакопеременных деформаций.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

3.1. Модели процессов и устройств в ЭС

Моделирование - исследование каких-либо явлений, процессов или систем объектов путем построения и изучения их моделей. Моделирование - одна из основных категорий теории познания. На идеи мо-

делирования базируется любой метод научного исследования - как теоретический, так и экспериментальный. Любое явление можно считать понятным, когда, во-первых, найдено его математическое описание, т. е. то, что мы называем математической моделью, а во-вторых, эта математическая модель исследована, т. е. найдено решение уравнений. Модель выражает количественные и качественные закономерности, свойственные рассматриваемым процессам или устройствам. Модель - это идеализация, она никогда не может быть точной копией объекта исследования, но между ними должны быть соблюдены некоторые соотношения подобия, которые гарантировали бы возможность использования сведений, полученных в результате моделирования для оценки свойств реального объекта - оригинала.

В общем случае исходные данные для проектирования конструкции, а значит и для построения ее модели, включают такие основные компоненты:

условия функционирования системы или явления, ограничения на структуру и параметры системы, совокупность показателей качества - некоторых параметров системы, определяющих ее качество и варьируемых в процессе проектирования;

ограничения на показатели качества, определяемые возможностями реализации системы.

Система, которая удовлетворяет всей совокупности условий и ограничений на параметры и структуру, называется допустимой. Допустимая система, которая удовлетворяет ограничениям на показатель качества, называется строго допустимой. Таким образом, задачей проектирования является создание строго допустимой системы, обладающей наилучшей, по заранее выбранному критерию, совокупностью значений показателей качества. Такая система может быть названа оптимальной. Чтобы получить такую систему, необходимо найти экстремальные значения показателей качества. Их зависимость от параметров системы носит название целевой функции. В целом совокупность целевых функций и ограничений представляет математическую формулировку задачи проектирования систем или явлений, т. е. является математической моделью объекта исследования. Математическая модель

может быть названа универсальным инструментом проектирования и использована в инженерном проектировании.

В проектировании используют следующие виды моделей:

графические и описательные (схемы, графики, которые иллюстрируют процессы, происходящие в устройствах, описания алгоритмов и т. д.);

физические - они полностью повторяют объект исследования и могут быть масштабными, повторяющимися в определенном масштабе форму объекта;

математические - это наиболее совершенные модели. Математические модели могут быть динамическими и статическими (стационарными), кроме того, интерполяционными (частными) и экстраполяционными (обобщенными). К интерполяционным обычно относят эмпирические модели, а к экстраполяционным - аналитические модели.

Проектирование сложных систем - это высокоинтеллектуальное творчество, требующее применения разнообразных знаний. При современных темпах научно-технического развития одним из главных требований проектирования является сокращение сроков, так как при увеличении сроков проектирования теряются новизна и оригинальность решений. Исследование процесса проектирования сложных объектов целесообразно проводить на математических моделях. На рис. 3.1 приведена одна из возможных классификаций математических моделей процесса проектирования сложных систем.



Рис. 3.1. Классификация математических моделей

Детерминированная модель строится в тех случаях, когда влияющие на конечный результат факторы рассматриваемого процесса поддаются точной оценке. Вероятностная модель строится тогда, когда факторы, влияющие на результат, носят случайный характер. Если процесс проектирования представить как процесс переработки информации, то для описания этого процесса можно использовать информационную модель. Эвристические модели не носят формализованного отображения объекта, они имеют описательную форму представления, так как проектирование основывается в значительной мере на интуиции, опыте специалистов, тем не менее этот процесс с известной степенью приближения представляется в этом случае эвристической моделью.

Для исследования математической модели может быть использован весь аппарат современной математики. При решении математических моделей могут применяться как аналитические методы, так и численные. Аналитические методы дают решение в общем виде, что очень существенно при больших вариациях исходных данных. Однако их целесообразно применять лишь в случаях простых зависимостей. Численные методы, основанные на использовании компьютеров, обеспечивают решение уравнений высших порядков и с большим числом переменных, но выдают решение только при конкретных исходных данных.

3.2. Моделирование процессов на основе аналогии

Разновидностью физических моделей являются аналоговые, в которых реальные физические процессы заменяются другими физическими процессами, но аналогичными по своему действию на рассматриваемый объект исследования. Например, исследования распределения температур в объекте можно более оперативно выполнить, если построить электрическую модель объекта, где источники тепла заменяются источниками тока, а тепловые сопротивления заменяются резисторами, включенными соответствующим образом.

Электротепловую аналогию можно выразить следующими уравнениями:

1. Плотности тока и теплового потока в изотропной среде

$$j = -\sigma \text{ grad } U; \quad P = -\lambda \text{ grad } t,$$

где U - потенциал; σ - удельная электропроводность; λ - коэффициент теплопроводности; t - температура.

2. Потоки j и P электрического и теплового полей

$$j = -\sigma \int_s \text{grad } U \cdot d\bar{s}; \quad P = -\lambda \int_s \text{grad } t \cdot dt.$$

3. Объемная плотность тока IV и производительность внутренних источников тепла

$$\text{div } \bar{j} = j_V; \quad \text{div } \bar{p} = q_V.$$

4. Поле потенциалов и температурное поле (уравнение Пуассона)

$$\Delta^2 H = -\frac{j_V}{\sigma}; \quad \Delta^2 t = -\frac{q_V}{\lambda},$$

т. е. аналогами являются:

$$\bar{j} \leftrightarrow \bar{p}; \quad J \leftrightarrow P; \quad j_V \leftrightarrow q_V; \quad U \leftrightarrow t; \quad \sigma \leftrightarrow \lambda.$$

Соотношения между аналогами определяются масштабными коэффициентами подобия: $k_p, k_V, k_t, k_\lambda, k_x, k_y, k_z$.

В случае геометрического подобия $k_x = k_y = k_z = k_L$. Для решения тепловой задачи необходимо задать граничные условия, характеризующие взаимодействие исследуемой области температурного поля с окружающей средой. Граничные условия вводятся к заданию значений самой искомой функции, ее производной либо их линейной комбинации на границах рассматриваемой области. Сущность метода электрических сеток заключается в разделении моделируемой области на элементарные объемы и замене сплошной проводящей среды элементарных объемов эквивалентными схемами замещения.

На основании объединения эквивалентных схем замещения элементарных объемов получаем модель в виде сетки электрических сопротивлений. Переход от сплошной проводящей среды к сетке сопротивлений означает замену непрерывного распределения величин в моделируемой области дискретным распределением, что соответствует конечно-разностной аппроксимации уравнения поля.

При построении сетки сопротивлений в прямоугольной системе координат элементарные объемы представляют собой параллелепипеды со сторонами $\Delta x, \Delta y, \Delta z$. При этом эквивалентные схемы замещения могут быть двух видов.

Узлы размещаются в центре элементарного параллелепипеда, а резисторы эквивалентной схемы замещения включаются между узлом и центрами граней; узлы размещаются в вершинах элементарного параллелепипеда, а резисторы эквивалентной схемы замещения включаются между узлами вдоль ребер параллелепипеда.

Выбрав ту или иную схему замещения, разделим моделируемую область на элементарные объемы для объемной задачи или на прямоугольники для плоской задачи таким образом, чтобы граничные узлы электрической сетки совпали с границами моделируемой области. Шаги деления вдоль всех осей координат считаем постоянными.

3.3. Основы моделирования конструкций и технологических процессов производства ЭС

Поскольку системный подход ориентирует конструктора и технолога на раскрытие целостности объекта проектирования (т. е. конструкции ЭС или технологического процесса), на выявление многообразных связей физических явлений в нем и сведение их в единый образ, то встает вопрос о практической фиксации этого образа с целью проведения его исследований. На всех этапах автоматизированного проектирования ЭС такая фиксация проводится в виде набора различных моделей.

Рассмотрим процесс автоматизированного проектирования ЭС с точки зрения использования в нем различного рода моделей.

На рис. 3.2 показано, что исходные данные на проектирование ЭС содержатся в техническом задании.

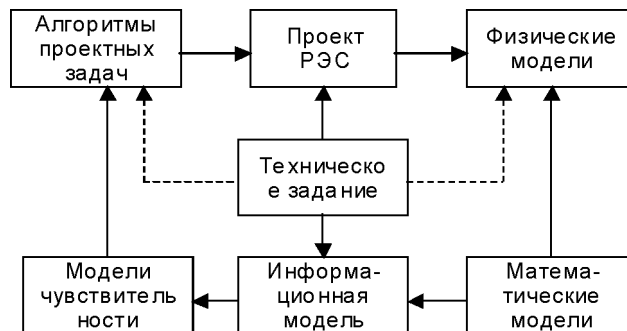


Рис. 3.2. Роль моделей в автоматизированном процессе разработки ЭС

И от него осуществляется переход непосредственно к проекту ЭС. Вначале, как уже упоминалось выше, проект предстает как мысленный образ будущей схемы и конструкции ЭС, который фиксируется в виде эскизных схем и чертежей. Впоследствии этот образ многократно уточняется по мере разработки схем и чертежей на стадиях технического и рабочего проектирования. При этом несколько раз циклически реализуется замкнутая цепь переходов от одной модели к другой.

Переход в очередном цикле от проекта ЭС к физическим моделям процессов, протекающих в схемах и конструкциях, заключается в формализации последних, т. е. структура схемы и конструкции приводится к типовому виду, предусматривающему определенный набор элементов с идеализированными свойствами. Рядом мелких деталей и локальных процессов пренебрегают. Но при этом учитываются требования технического задания на проектирование с точки зрения отражения в физической модели тех особенностей протекания процессов, по которым оценивается разрабатываемая аппаратура (пунктирная стрелка на рис. 3.2).

Первый пример: при переходе к физической модели электрического процесса, протекающего в схеме ЭС, структура каждого его радиоэлемента (резистора, транзистора, микросхемы и пр.) формализуется, т. е. графически изображается (или условно подразумевается) геометрия, в которую внесена некоторая идеализация. В рамках данной геометрии рассматривается протекание электрического процесса. Паразитные связи, вносимые конструкцией, отражаются в физической модели с помощью условных обозначений идеальных РЭ (резистора, конденсатора, транзистора и пр.). Это дает возможность применять впоследствии для математического описания физических моделей схем канонические формулы и уравнения для элементов или типовые формы графов для них.

Второй пример: печатная плата с расположенными на ней РЭ (печатный узел) при исследовании на механические воздействия формализуется в виде тонкой ортотропной пластины с сосредоточенными на ней массами РЭ, контуры которых идеализируются прямоугольниками, вписанными в нанесенную на чертеж платы сетку. Идеализируются также свойства материала платы, а именно принимается гипотеза

его однородности вдоль сторон платы, не учитываются расположенные на плате печатные проводники и отверстия, в которые впаяны ножки РЭ, и т. п. Такое представление печатного узла позволяет описать его колебания с помощью бигармонического уравнения, известного из теории упругости для тонких пластин.

В результате формализации получаются физические модели, которые изображаются в условных обозначениях и соответствующих терминах: электрические модели - в терминах электроники и радиотехники, механические модели - механики, тепловые модели - теории теплообмена и т. д. В принципе физические модели ЭС можно изготовить в виде макетов. Однако автоматизация проектирования с помощью компьютеров сделала макетирование практически ненужным, поскольку математическое моделирование позволяет более полно и с меньшей трудоемкостью провести системный анализ комплекса физических процессов ЭС.

Переход от физических моделей к математическим (рис.3.2) осуществляется путем математического описания физических элементов и их соединений с помощью известных законов Ома, Кирхгофа, Фурье, Гаука, сохранения энергии, импульса и пр. Поэтому данный переход от заданной физической модели может выполняться автоматически по типовым алгоритмам. Математические модели являются основой для расчета выходных характеристик ЭС, а также его промежуточных переменных величин и показателей, по которым оценивается фактическое состояние схемы и конструкции или технологического процесса (если в исследованиях рассматривается его модель). Вместе с предельными значениями, оговоренными в техническом задании на проектирование, эти характеристики, промежуточные переменные и показатели составляют информационную модель ЭС. Она содержит в себе информацию о степени удовлетворения предъявляемых к ЭС требований об электрических, тепловых, механических и прочих перегрузках радио- и конструктивных элементов, о возможных отказах и ухудшении качества.

Информационная модель ЭС дает возможность выработать рекомендации о необходимости дальнейших исследований и внесения изменений в ее проект. При этом определяют, какие выходные характе-

ристики и насколько нужно изменить. Исходя из конструктивного исполнения ЭС и некоторых других соображений, выделяется множество внутренних параметров элементов, которые могут быть управляемыми.

Для выяснения, какие же из управляемых параметров целесообразно использовать для изменения выходных характеристик, необходимо рассчитать функции чувствительности рассматриваемых выходных характеристик к каждому управляющему параметру. В простейшем случае коррекция одной выходной характеристики может быть осуществлена за счет изменения одного внутреннего параметра, к которому эта характеристика наиболее чувствительна. Поэтому следующим шагом после анализа информационной модели является построение моделей чувствительности. Расчет необходимых приращений управляемых параметров на основе полученных функций чувствительности производится с помощью алгоритма, входящего на рис.3.2 в блок «Алгоритмы проектных задач». Одновременно решаются другие проектные задачи: оптимизации параметров; исследования их разбросов, включая задачи технологической точности, серийнопригодности, эксплуатационной стабильности, надежности и пр. На основании полученных проектных решений вносятся изменения в схему, конструкцию и технологию, т. е. в проектную документацию.

4. НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

4.1. Основные понятия надежности ЭС

Надежность – свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени и в заданных пределах значения установленных эксплуатационных показателей. При этом объект – техническое изделие определенного целевого назначения, рассматриваемое в периоды проектирования, производства, испытаний и эксплуатации.

Объектами могут быть различные системы и их элементы.

Элемент – простейшая составная часть изделия, в задачах надежности может состоять из многих деталей.

Система – совокупность совместно действующих элементов, предназначенная для самостоятельного выполнения заданных функций.

Надежность объекта характеризуется следующими основными состояниями и событиями.

Исправность – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией.

Работоспособность – состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров, установленных нормативно-технической документацией.

Основные параметры характеризуют функционирование объекта при выполнении поставленных задач.

Понятие исправность шире, чем понятие работоспособность. Работоспособный объект обязан удовлетворять лишь тем требованиям нормативно-технической документации, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению. Таким образом, если объект неработоспособен, то это свидетельствует о его неисправности. С другой стороны, если объект неисправен, то это не означает, что он неработоспособен. Предельное состояние – состояние объекта, при котором его применение по назначению недопустимо или нецелесообразно.

Для некоторых объектов предельное состояние является последним в его функционировании, т.е. объект снимается с эксплуатации, для других – определенной фазой в эксплуатационном графике, требующей проведения ремонтно-восстановительных работ. В связи с этим объекты могут быть:

- невосстанавливаемые, работоспособность которых в случае возникновения отказа не подлежит восстановлению;

- восстанавливаемые, работоспособность которых может быть восстановлена, в том числе и путем замены.

К числу невосстанавливаемых объектов можно отнести, например: объекты, состоящие из многих элементов, например, бытовая электроника, радиолокационная станция и другая электронная аппаратура, являются восстанавливаемыми, поскольку их отказы связаны с повреждениями одного или немногих элементов, которые могут быть заменены.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Критерий отказа – отличительный признак или совокупность признаков, согласно которым устанавливается факт возникновения отказа. По своей природе отказы могут быть:

- случайные, обусловленные непредусмотренными перегрузками, дефектами материала, ошибками персонала или сбоями системы управления и т. п.;

- систематические, обусловленные закономерными и неизбежными явлениями, вызывающими постепенное накопление повреждений: усталость, износ, старение, коррозия и т. п.

По характеру возникновения:

- внезапный отказ – отказ, проявляющийся в резком (мгновенном) изменении характеристик объекта;

- постепенный отказ – отказ, происходящий в результате медленного, постепенного ухудшения качества объекта .

Внезапные отказы обычно проявляются в виде механических повреждений элементов (трещины – хрупкое разрушение, пробои изоляции, обрывы и т. п.) и не сопровождаются предварительными видимыми признаками их приближения. Внезапный отказ характеризуется независимостью момента наступления от времени предыдущей работы.

Надежность является комплексным свойством, включающим в себя в зависимости от назначения объекта или условий его эксплуатации ряд простых свойств: безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторой наработки или в течение некоторого времени. Наработка – продолжительность или объем работы объекта, измеряемая в любых неубывающих величинах (единица времени, число циклов нагружения и т. п.).

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

Ремонтпригодность – свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возник-

новения отказов, поддержанию и восстановлению работоспособности путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

Сохраняемость – свойство объекта непрерывно сохранять требуемые эксплуатационные показатели в течение (и после) срока хранения и транспортирования.

В зависимости от объекта надежность может определяться всеми перечисленными свойствами или частью их.

Показатель надежности количественно характеризует, в какой степени данному объекту присущи определенные свойства, обуславливающие надежность. Наиболее важные показатели надежности невосстанавливаемых объектов – показатели безотказности, к которым относятся: вероятность безотказной работы, плотность распределения отказов, интенсивность отказов, средняя наработка до отказа.

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации (в том числе хранение, ремонт и т. п.) от ее начала до наступления предельного состояния.

Показатели надежности представляются в двух формах (определениях):

- статистическая (выборочные оценки);
- вероятностная.

Статистические определения (выборочные оценки) показателей получают по результатам испытаний на надежность.

Показатели, определенные для выборки и позволяющие сделать какие-то выводы о случайной величине, являются выборочными (статистическими) оценками. Очевидно, что при достаточно большом числе испытаний (большой выборке) оценки приближаются к вероятностным показателям.

Основным показателем надежности элементов является функция $\lambda(t)$, называемая интенсивностью отказов.

Интенсивность отказов характеризует уровень надежности элементов в каждый момент времени, так как для каждого момента времени определяется доля отказавших элементов из числа исправных к этому моменту времени.

Естественно, что эта картина изменения интенсивности отказов не является универсальной. Есть элементы, у которых отсутствует период

приработки (например, хорошо поставленный контроль отсеивает все дефектные элементы), есть элементы, которые практически не стареют. Однако у большинства элементов имеется, как правило, длительный период, на котором интенсивность отказов практически постоянна.

Это означает, что для широкого класса элементов в период нормальной эксплуатации, в течение которого появляются, главным образом, внезапные отказы, $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$. Из постоянства интенсивности отказов следует, что закон распределения времени работы элементов до отказа является экспоненциальным.

В процессе эксплуатации ЭС подвергаются воздействию комплекса внешних и внутренних факторов (температура, влажность, вибрация, удары, радиация, уровень электрической нагрузки и др.) Одновременное воздействие на ЭС комплекса внешних и внутренних факторов приводит к изменениям электрических и механических свойств материалов, из которых изготовлены элементы ЭС, и, следовательно, к изменению параметров этих элементов. Изменения параметров элементов могут происходить как скачкообразно, так и постепенно. Соответственно в зависимости от характера изменения параметра элемента к моменту возникновения отказа различают внезапные и постепенные отказы.

Удельный вес постепенных отказов особенно значителен для активных элементов; для резисторов и конденсаторов характерно преобладание внезапных отказов.

4. 2. Расчёт надёжности при проектировании ЭС

Рассмотрим непосредственно расчёт надёжности технических систем. Прежде всего определим задачу расчета надёжности: определение показателей безотказности системы, состоящей из невосстанавливаемых элементов, по данным о надёжности элементов и связях между ними. Далее установим цель расчета надёжности:

- обосновать выбор того или иного конструктивного решения;
- выяснить, достижима ли требуемая надёжность при существующей технологии разработки и производства;
- если необходимо, выяснить возможность и целесообразность резервирования.

Расчет надежности состоит из следующих этапов:

1. Определение состава рассчитываемых показателей надежности.
2. Составление (синтез) структурной логической схемы надежности (структуры системы), основанное на анализе функционирования системы (какие блоки включены, в чем состоит их работа, перечень свойств исправной системы и т. п.), и выбор метода расчета надежности.
3. Составление математической модели, связывающей рассчитываемые показатели системы с показателями надежности элементов.
4. Выполнение расчета, анализ полученных результатов, корректировка расчетной модели.

В процессе эксплуатации ЭС подвергаются воздействию комплекса внешних и внутренних факторов, основные из которых температура, влажность, вибрация, удары, атмосферное давление и уровень электрической нагрузки. Одновременное воздействие на ЭС комплекса внешних и внутренних факторов приводит к изменениям электрических и механических свойств материалов, из которых изготовлены элементы ЭС, и следовательно, к изменению параметров этих элементов. Поэтому рассмотрение надёжности ЭС следует начинать с надёжности электрорадиоэлементов, входящих в её состав.

Для решения задач по оценке надежности и прогнозированию работоспособности объекта необходимо иметь математическую модель, которая представлена аналитическими выражениями одного из показателей $P(t)$, или $f(t)$, или $\lambda(t)$. Основным путём для получения модели состоит в проведении испытаний, вычислении статистических оценок и их аппроксимации аналитическими функциями.

Вид аналитической функции, описывающей изменение показателей надежности $P(t)$, $f(t)$ или $\lambda(t)$, определяет закон распределения случайной величины, который выбирается в зависимости от свойств объекта, его условий работы и характера отказов.

Выбор закона распределения состоит в подборе аналитической функции, наилучшим образом аппроксимирующей эмпирические функции надежности. Выбор в значительной мере процедура неопределенная и во многом субъективная, при этом многое зависит от априорных знаний об объекте, его свойствах и условиях работы.

На основе многолетних статистических исследований было определено, что 95% отказов электронных средств подчиняется экспоненциальному закону, который описывает наработку до отказа объектов, у которых в результате сдаточных испытаний (выходного контроля) отсутствует период приработки, а назначенный ресурс установлен до окончания периода нормальной эксплуатации. Эти объекты можно отнести к «не стареющим», поскольку они работают только на участке с $\lambda(t) = \text{const}$.

Расчет надёжности ЭС производится на этапе технического проектирования, когда известна принципиальная схема устройства, точное число элементов каждого типа и уровень электрической нагрузки каждого электрорадиоэлемента. При этом принимаются следующие допущения:

- отказ любого элемента приводит к полному отказу ЭС (условно все электрорадиоэлементы ЭС соединены последовательно, в смысле надёжности);

- интенсивности отказов всех элементов не зависят от времени, $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ (условно у элементов, входящих в ЭС, отсутствуют процессы старения и износа);

- все электрорадиоэлементы функционируют постоянно и одновременно;

- отказы электрорадиоэлементов взаимонезависимые.

Условия эксплуатации ЭС оказывают существенное влияние на ее надёжность, и тем сильнее, чем выше уровни нагрузок внешних факторов (влажность, температура, пониженное давление, механические воздействия). Поэтому при расчете надёжности по внезапным отказам вводятся поправочные коэффициенты, учитывающие действие вибрации и ударных нагрузок α_m , влажности α_v , изменения температуры α_t , пониженного давления α_d . Так как все воздействия ухудшают надёжность, поэтому все соответствующие коэффициенты больше или равны 1. Значения указанных коэффициентов для различных условий эксплуатации можно найти в справочной литературе.

Окончательное значение интенсивности отказов ЭС находится по формуле

$$\Lambda = \sum \lambda_i n_i \alpha_i ,$$

где $\alpha_i = \alpha_{им} \alpha_{iT} \alpha_{iВ}, \alpha_{ид}$ – соответствующие поправочные коэффициенты, учитывающие влияние механических воздействий ($\alpha_{им}$), влаги ($\alpha_{iВ}$), температуры (α_{iT}) и давления ($\alpha_{ид}$).

Вероятность безотказной работы ЭС определяется по формуле

$$P(t) = e^{-\Lambda t},$$

где t - заданное время непрерывной работы ЭС.

Наиболее широко в инженерной практике применяются ориентировочный и окончательный расчеты надежности.

Ориентировочный расчет надежности производится на этапе эскизного проектирования, когда отсутствуют точные сведения об электрических режимах работы радиоэлементов, но известно приблизительное число элементов каждого типа.

Окончательный расчет производится на этапе технического проектирования. В этом случае известны точное число элементов каждого типа и уровень электрической нагрузки каждого элемента.

При расчете $P(t)$ в качестве t часто берётся общее требуемое время эксплуатации ЭС. Это неверно, так как при этом не учитывается природа внезапных отказов, вызванных случайными концентрациями нагрузок внутри и вне элемента. Для внезапных отказов, как указывалось ранее, закон распределения времени до отказа является экспоненциальным. Необходимость определения t как заданного времени непрерывной работы теоретически обосновывается характеристическим свойством экспоненциального закона распределения: вероятность безотказной работы на данном интервале ($t \dots t + \tau$) не зависит от времени предшествующей работы, а зависит только от длины интервала τ . Поэтому для экспоненциального закона распределения времени работы элемента до отказа вероятность безотказной работы $P(t \dots t + \tau)$ равна

$$P(t, t + \tau) = e^{-\Lambda \tau}.$$

Это свойство называется характеристическим, так как если оно выполняется для какого-то закона распределения, то этот закон обязательно будет экспоненциальным.

Надежность ЭС зависит не только от выбора схемы и технических характеристик аппаратуры, но и от режимов работы аппаратуры и условий ее эксплуатации; от технологии производства и от используе-

мой в производстве системы контроля качества; от качества исходных материалов и комплектующих элементов; от уровня квалификации производственного, контрольного и эксплуатирующего аппаратуру персонала.

Обеспечить высокую надежность аппаратуры можно суммой мероприятий, выполняемых на всех этапах разработки, производства и эксплуатации. Особое место в этом процессе принадлежит этапу разработки, так как все принципы обеспечения надежности выбирают на этом этапе. Разработчик современной ответственной ЭС должен стремиться обеспечить чрезвычайно высокую надежность аппаратуры, учитывая все реальные эксплуатационные ситуации. При этом необходимо удовлетворить целый ряд основных требований к изделию: обеспечение его необходимых технических и тактико-технических характеристик (габариты, масса, чувствительность, точность, быстродействие, время приведения в готовность), ограничение конструктивной сложности, снижение стоимости и сроков разработки и т.д. Разработчик должен выбрать оптимальное решение, обеспечивающее и высокую надежность, и требуемые технические характеристики.

Требования к надежности разрабатываемого изделия задаются в техническом задании на разработку. На ранних стадиях разработки изделия составляется план обеспечения надежности, который на последующих стадиях разработки детализируется и уточняется. Одним из элементов этого плана является расчет надежности проектируемого изделия. Первые расчеты надежности делают на ранних стадиях разработки, а с уточнением сведений об изделии уточняются и расчеты надежности. Существующие методы расчета надежности позволяют получить расчетным путем количественные характеристики надежности разрабатываемого изделия и сопоставить эти характеристики с заданными в техническом задании.

Все расчеты надежности в основном сводятся к определению вероятности безотказной работы $P(t)$ и средней наработки до первого отказа T_{cp} по известным интенсивностям отказов элементов схемы. В зависимости от полноты учета факторов, влияющих на работу изделия и его надежность, последовательно проводят три расчета надежности: прикидочный, ориентировочный, окончательный.

Ориентировочный расчет проводится тогда, когда на изделие и все его составные части разработаны электрические принципиальные схемы. При ориентировочном расчете учитывается влияние на надежность изделия количества и типов применяемых в схемах элементов. При расчете делаются следующие допущения: все элементы схемы работают в нормальном режиме, предусмотренном техническими условиями на эти элементы; все элементы изделия работают одновременно; интенсивности отказов элементов берутся для периода нормальной работы, т. е. $\lambda_i(t) = \text{const}$. Интенсивности отказов элементов каждого типа берутся по соответствующим таблицам из справочников по надежности. Таким образом, ориентировочный расчет надежности позволяет определить рациональный состав элементов в изделии и наметить пути повышения надежности.

Окончательный расчет проводится на этапе технического проектирования и учитывает влияние на характеристики надежности режимов работы элементов в схеме и конкретные условия эксплуатации изделия.

Необходимым условием получения наиболее точных характеристик надежности при окончательном расчете является знание зависимости интенсивности отказов элементов от воздействующих внешних факторов.

При расчете характеристик надежности все изделия расчленяются на приборы, приборы на блоки, блоки на крупные узлы, крупные узлы на более мелкие узлы и т. д. При этом расчет производится последовательно от простого к сложному.

4.3. Расчет показателей надежности ЭС

Под расчетом показателей надежности будем понимать определение числовых значений показателей по тем или иным исходным данным. В связи с включением количественных показателей надежности в технические требования на аппаратуру возникает необходимость не только теоретической, но и опытной проверки выполнения этих требований по статистическим данным.

Сложная ЭС состоит из отдельных блоков, узлов, элементов, от надежности которых зависит реализация установленных параметров надежности ЭС в целом.

Получив от главного конструктора системы долю надежности i -той подсистемы, а также критериев ее отказов, разработчики подсистемы проектируют ее с учетом поставленных требований к ее надежности. При этом определяют необходимость и объем резервирования, средства встроенного контроля, режима работы элементов и выбирают элементы с требуемой надежностью.

В процессе эксплуатации ЭС вследствие износа и необратимых процессов старения характеристики аппаратуры будут изменяться. Надежность ЭС непосредственно связана со стоимостью изделий. В табл. 4.1. приведена относительная стоимость ущерба, причиненная одним отказом в различных классах ЭС.

Таблица 4.1. Относительная стоимость ущерба

Вид аппаратуры	Замена детали	Замена платы	Пере- проверка и ремонт	Натурные испытания и ремонт
Индивидуального пользования	2	2	5	50
Промышленная ЭС специального назначения	4	25	45	$215 \cdot 10^3$
Космическая электронная аппаратура	7	50	120	$2 \cdot 10^6$
	15	15	300	-

Надежность современных ЭС в основном зависит от достижимого уровня надежности составляющих их технических средств и определяется надежностью составляющих ее компонентов. Кроме того, современная ЭС характеризуется возрастающей интенсивностью режимов эксплуатации, ужесточением требований к точности и эффективности работы, все большей нечувствительностью к внутренним и внешним дестабилизирующим факторам, а также увеличивающимся

уровнем автоматизации работы. Отсюда следует, что дальнейший технический прогресс невозможен без увеличения показателей надежности технических устройств.

Важным фактором повышения надежности ЭС на этапе конструирования является равномерное распределение нагрузок на составляющие ее компоненты, поскольку интенсивность отказов последних во многом зависит от условий их работы.

Нагрузки, действующие на ЭС, можно условно разделить на две группы: первые приводят к постепенным отказам, вторые к внезапным. Нагрузки, вызывающие постепенные отказы, обусловлены в основном влиянием внешней среды - климатическими факторами, естественной и искусственной радиацией и т.п. При длительном их воздействии независимо от того, работает устройство или находится в нерабочем состоянии, в его элементах и узлах происходят необратимые изменения.

Так, например, сопротивления резисторов могут отклоняться от своих номиналов на 60%, емкости конденсаторов – на 80%, коэффициент передачи тока базы и обратный ток коллектора транзистора – на 100%. Исключить влияние таких воздействий конструктивно практически невозможно.

Нагрузки, вызывающие внезапные отказы, проявляются при работе ЭС. К нагрузкам относятся электрические, механические, тепловые, магнитные и пр. Они уменьшают прочность компонентов ЭС и усиливают их износ. Уменьшение вредного влияния второй группы зависит от разработчика. Например, снижение тепловых нагрузок всего на 20% увеличивает надежность ЭС в среднем в 2...2,5 раза.

Простота конструкторских решений – залог надежности. Поэтому всякий раз, когда можно, следует отдавать предпочтение схемам, содержащим меньшее число элементов, а сами схемы проектировать таким образом, чтобы чувствительность их выходных параметров к изменению параметров комплектующих элементов была наименьшей. Это способствует снижению постепенных отказов.

К основным факторам, влияющим на надежность, относятся: выбор схем, обеспечивающих расширение поля до пучков на параметры ЭС схемно-техническими методами для практического исключения

«постепенных» отказов; выбор элементов с необходимой надежностью, их энергетическую разгрузку в рациональных пределах и защиту от дестабилизирующих факторов конструктивными методами; разработка методов и аппаратуры контроля.

Затем составляется схема надежности каждой из подсистем в целом для последующего проведения аналитического расчета надежности.

Как было сказано ранее, надежность ЭС напрямую зависит от надежности электрорадиоэлементов, а как мы знаем, одни и те же элементы имеют разброс по надежности, а соответственно и по стоимости. Так, например, электролитические конденсаторы имеют разброс по надежности от $100 \cdot 10^{-6}$ 1/ч до $10 \cdot 10^{-6}$ 1/ч, а по стоимости они отличаются в десятки раз. Кроме того, для того чтобы уровень разрабатываемой ЭС соответствовал уровням мировых стандартов, необходимо, чтобы соотношение цена/качество было не хуже, чем у других фирм. С этих соображений выбор элементной базы только по показателям надежности, как это делают некоторые разработчики аппаратуры, может привести к такому удорожанию ЭС, что исчезает необходимость в выпуске подобных ЭС.

Наиболее правильно использовать показатели надежности, которые даны в ТУ на данный элемент, однако предприятия, выпускающие электрорадиоэлементы, стараются эти данные не показывать. Во-первых, чтобы не снизить покупательский интерес к их продукции, а во-вторых, использование некоторых справочных данных (по интенсивности отказов) дает абсурдные результаты по наработке ЭС на отказ (до 100 и более лет). Примерные значения интенсивностей отказов распространенных и относительно дешевых электрорадиоэлементов представлены в табл. 4.2.

Интенсивности отказов, приведенные в табл. 4.2, взяты при нормальных условиях. Поэтому при расчете надежности необходимо определить, какие внешние воздействия будет испытывать наше устройство, а затем эти значения увеличить для каждого типа элементов на соответствующие коэффициенты, величина которых находится в пределах от 1,4, а то и выше.

Таблица 4.2. Интенсивности отказов

№ п /п	Наименование элемента	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}$, 1/ч
1	Резистор, С2-23	5...10
2	Конденсаторы, КТ, КД, КЛС	5...10
3	Конденсаторы электролитичес.	50...100
4	Индуктивности, трансформаторы	50...100
5	Транзисторы, диоды, ИС	0,5...1,0
6	Разъемы, штекера, вилки	0,5...2,0
7	Пайка	0,1...0,01

Поэтому разработчик ЭС должен вести проектирование по следующим ступеням. Сначала используя самые распространенные и дешевые элементы, но с относительно низкой надежностью, а затем выбирать компромиссное решение, хотя бы из двух позиций, что более важно в конкретном случае - стоимость или надежность. И конечно помнить, что практически любое увеличение надежности связано со значительным увеличением стоимости, что должно быть отмечено в конце расчетов.

Для расчета показателей надежности ЭС необходимо иметь принципиальную схему ЭС, спецификацию к ней. Затем установить условия эксплуатации с тем, чтобы ввести поправки в расчеты интенсивности отказов.

Предположим, мы рассчитываем надежность усилительного устройства, используемого для проигрывания компакт-дисков в домашних условиях.

Выбранное устройство предназначено для эксплуатации в следующих бытовых условиях:

1. Диапазон рабочих температур: 10... 40 °С;
2. Относительная влажность: в пределах 60...95% при 20° С;
3. Атмосферное давление: 101300 Па.
4. Время гарантийной работы: 12 месяцев.

При экспоненциальном распределении отказов в ЭС (а наше изделие имеет именно такой закон распределения отказов) надежность

характеризуется: вероятностью безотказной работы в течение заданного промежутка времени, средним временем наработки на отказ, интенсивностью отказа устройства.

Для расчета надежности рассматриваемого ЭС примем схему надежности, состоящую из последовательно соединенных невосстанавливаемых элементов и математическую модель надежности по случайным отказам, имеющую экспоненциальное распределение. Данная модель полагает, что отказы элементов независимы, а элементы и все устройство в целом могут находиться в одном из двух состояний: работоспособном или неработоспособном.

Таблица 4.3. Интенсивности отказов и поправочные коэффициенты

Тип элемента	n_i	$\lambda_i, 1/\text{ч}$	α_{IT}	α_{IB}	$n_i \lambda_i \alpha_{\text{IT}} \alpha_{\text{IB}} 10^{-6}, 1/\text{ч}$
Громкоговоритель	1	100	1,2	1,2	144
Конденсаторы керамические	17	10	1,1	1,1	244,8
Конденсаторы электролитические	5	100	1,1	1,1	605
Конденсаторы переменной емкости	2	10	1,1	1,2	26,4
Резисторы С2-23	21	10	1,1	1,1	254,1
Рпер	1	25	1,2	1,2	36
Диоды	5	1	1,4	1,0	7
Транзисторы	14	1	1,4	1,0	19,6
Катушка индуктивности	3	100	1,4	1,3	546
Разъемы	6	1	1,0	1,0	6
Пайка	39	0,1	1,2	1,0	4,68

При этих допущениях параметры надежности вычисляются по следующим формулам:

-интенсивность отказов устройства:

$$\lambda = \sum \lambda_i \cdot n_i \cdot \alpha_M, \alpha_B, \alpha_T, \alpha_D,$$

где n_i - количество функционально аналогичных элементов в схеме, имеющих одинаковую интенсивность отказов λ_i ; $\alpha_M, \alpha_B, \alpha_T, \alpha_D$ - поправочные коэффициенты, учитывающие внешние воздействия (механические, влажность, температуру, давление);

- вероятность безотказной работы:

$$P(t) = e^{-\Lambda \cdot t};$$

- время наработки на отказ:

$$T_H = 1/\lambda.$$

Интенсивности отказов отдельных элементов приведены в табл. 4.2, а поправочные коэффициенты в табл. 4.3.

Интенсивность отказов системы

$$\Lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_{0i} \cdot \alpha_i \cdot n_i = 1749,9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Рассчитаем вероятность безотказной работы данного устройства, при условии, что изделие будет работать 1 час в день в течение 12 - месячного гарантийного срока, т. е. 365 часов:

$$P(t) = e^{-\Lambda t} = \exp(-1749,9 \cdot 10^{-6} \cdot 365) = 0,36.$$

Среднее время наработки на отказ составит

$$T_H = \frac{1}{\Lambda} = 571 \text{ ч.}$$

Для бытовой аппаратуры вероятность безотказной работы должна составлять не менее 0,91. Рассчитанная вероятность безотказной работы выбранного устройства составляет 0,36, что не удовлетворяет норме.

Для того чтобы данное изделие соответствовало международным стандартам, необходимо повысить его надёжность. Достичь этого можно за счет стоимости всего изделия, используя более надежные элементы.

Вместо резисторов гораздо логичнее использовать микросборку, а указанные в перечне электролитические конденсаторы можно за-

менить более надёжными конденсаторами типа ЭТО-1, интенсивность отказов которых 10^{-5} 1/ч, а также за счет увеличения стоимости взять и другие более надежные элементы (данные приведены в табл. 4.4).

Тогда интенсивность отказов составит:

$$P(t) = e^{-\Lambda \cdot t} = \exp(-277,12 \cdot 10^{-6} \cdot 365) = 0,91,$$

а среднее время наработки на отказ

$$T_H = \frac{1}{\Lambda} = 3600 \text{ ч.}$$

Таблица 4.4. Интенсивности отказов и поправочные коэффициенты

Тип элемента	n_i	λ_i , 1/ч	$\alpha_{гг}$	$\alpha_{иб}$	$n_i \cdot \lambda_i \cdot \alpha_{гг} \cdot \alpha_{иб}$ 10^{-6} , 1/ч
Громкоговоритель	1	10	1,2	1,2	14,4
Конденсаторы керамические	17	5	1,1	1,1	103,3
Конденсаторы электролитические	5	5	1,1	1,1	30,5
Конденсаторы переменной емкости	2	10	1,1	1,2	24
Резисторы С2-23 (микросборка)	21	1,0	1,2	1,2	1,44
Рпер	1	10	1,2	1,2	14,4
Диоды	5	1	1,4	1,0	7
Транзисторы	14	1	1,4	1,0	16,8
Катушка индуктивности	3	10	1,4	1,3	54,6
Разъемы	6	1	1,0	1,0	6
Пайка	39	0,1	1,1	1,0	4,68

ПРИЛОЖЕНИЕ

Контрольная работа

Провести статическую обработку результатов измерений. Оценить стабильность технологического процесса, исходя из того что в течение рабочей смены было взято m выборок из N деталей каждая. Результаты контролируемого параметра деталей (не менее 50 значений) выбираются самостоятельно.

Порядок вычислений.

1. Исключить из выборок ошибочные результаты, не характерные для данной совокупности.
2. Построить гистограммы и определить вид закона распределения.
3. Вычислить оценки математического ожидания и дисперсии контролируемого параметра.

Для оценки надежности по статистическим данным необходима большая работа по правильному и объективному сбору этих данных. Объем собираемой информации определяется целями оценки, особенностями РЭС и условиями ее эксплуатации.

Для определения количественных показателей надежности и выявления наименее надежных элементов при сборе статистических данных необходимо получить:

- сведения об отказавшем блоке, узле, элементе и его изготовителе;
- сведения о времени наступления отказа; сведения о причине отказа;
- сведения о наработке (интенсивности отказов отдельных элементов, блоков, аппаратуры в целом);
- сведения о времени ремонта на месте, в мастерской, времени простоя.

Расчет надежности по статистическим данным может проводиться либо в процессе испытаний на надежность, либо на основе опыта эксплуатации.

Для сбора статистических данных о надежности разрабатываются специальные журналы учета отказов и отчеты о надежности.

При расчете надежности по данным отчетов для каждого типа аппаратуры составляется таблица отказов (табл. К 1).

На основании этой таблицы строится вариационный ряд наработки данного устройства (табл. К 2).

Необходимо прежде всего установить зависимость между выходным и первичным параметром изделия. Если эта зависимость неизвестна, то ее можно получить в ряде случаев методами, известными из теории электрических цепей. В общем случае искомые электрические параметры и их соотношения могут быть найдены в результате совместного решения системы уравнений, выражающих первый и второй закон Кирхгофа для заданной электрической цепи. Расчет допусков электрических схем, содержащих нелинейные элементы (интегральных схем, транзисторов и т.д.), связан с определенными трудностями. Упрощение состоит в том, что цепи с нелинейными элементами при малых уровнях сигналов с некоторой погрешностью можно рассматривать как линейные. С этой целью применяют линейные модели нелинейных элементов. На практике для расчета электрических схем широко распространяется метод контурных токов. Расчет допусков геометрических размеров конструкций начинают с составления уравнения размерной цепи. Размерная цепь может быть плоской и пространственной, содержать линейные и угловые размеры, с параллельными и непараллельными размерами (звеньями). Любая размерная цепь имеет только один размер (звено), который можно рассматривать как функцию всех остальных размеров цепи. Такой размер называют замыкающим. Остальные размеры (звенья) называют составляющими. В общем случае уравнение размерной цепи можно выразить зависимостью между входной и выходной величинами. В этом случае замыкающий размер является выходным параметром, а составляющие размеры входными (первичными) параметрами. При составлении уравнения размерной цепи ее удобно представить графически в виде замкнутого контура размеров, которые располагаются в последовательности их сопряжения в конструкции.

Известные методы расчета позволяют выполнить анализ и синтез допусков. Анализ состоит в том, что по известным погрешностям первичных параметров вычисляют допуск выходного параметра. Эта задача имеет единственное решение. Синтез состоит в том, что по заданному допуску выходного параметра вычисляют допуски первичных параметров. Эта задача имеет множество решений. Неформальные приемы синтеза сводятся к перебору вариантов или «синтезу через ана-

лиз». Суть его состоит в том, что вначале изменяется «первоначальный» вариант. Этот вариант вычисляется известными методами анализа. Результаты сравниваются с заданными. Если имеется существенная разница (определяемая заданной погрешностью), то намечается другой вариант решения с учетом выбора.

Для определения надежности ЭС необходимо иметь:

сведения о наработке (интенсивности отказов отдельных элементов, блоков, аппаратуры в целом);

сведения о времени ремонта на месте, в мастерской, времени простоя.

Расчет надежности по статистическим данным может проводиться либо в процессе испытаний на надежность, либо на основе опыта эксплуатации.

Для сбора статистических данных о надежности разрабатываются специальные данные для расчета надежности. Основой является журнал учета отказов и отчеты о надежности.

При расчете надежности по данным отчетов для каждого типа аппаратуры составляется таблица отказов (табл. К 1).

На основании этой таблицы строится вариационный ряд наработки данного устройства (табл. К 2).

Таблица К 1

Номер отказа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Наработка T _{нар.} , ч	37	53	86	65	20	15	18	69	77	50
Номер отказа	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Наработка T _{нар.} , ч	60	25	21	30	119	107	98	56	35	28
Номер отказа	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Наработка T _{нар.} , ч	20	30	90	30	70	80	90	80	17	16

Таблица К 2

Номер отказа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Наработка $T_{нар.}$ ч.	15	16	17	18	20	20	21	25	28	30
Номер отказа	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Наработка $T_{нар.}$ ч.	30	30	35	37	50	53	56	60	65	69
Номер отказа	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Наработка $T_{нар.}$ ч.	70	77	80	80	86	90	90	98	107	119

Для наглядности в табл. К 1 и К 2 приведены числовые значения.

При большем числе наблюдений (порядка сотен) вариационный ряд перестает быть формой записи статистического материала – он становится слишком громоздким и малонаглядным. Для придания ему большей компактности и наглядности он подвергается дополнительной обработке. Для этого весь диапазон зафиксированных значений отказов делится на интервалы времени Δt_i и подсчитывается количество отказов n_i , приходящихся на каждый i -й интервал.

Далее строится табл. К 3, в которой приводятся интервалы в порядке их расположения вдоль оси абсцисс (число отказов в интервале t_i), оценки рассчитываемых показателей надежности для каждого интервала Δt_i .

Таблица К 3

Δt_i	n_i	$P(t)$	$q(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$	$T_o, ч$
--------------	-------	--------	--------	--------	--------------	----------

В качестве примера в табл. К 3 приведен статистический ряд по данным вариационного ряда табл. К 2. Интервал Δt_i принят равным 20ч.

Эта таблица называется статистическим рядом. По данным этого ряда строятся гистограммы для оцениваемых показателей надежности.

В дальнейшем построение гистограммы аппроксимируется кривой, по виду которой можно ориентировочно установить закон распределения отказов путем сравнения с соответствующими кривыми.

Таблица К 4

$\Delta t_i, \text{ч}$	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120
n_i	16	5	2	3	2	2
$\lambda(t), 1/\text{ч}$	0.0336	0.0218	0.0125	0.027	0.033	-
$P(t)$	0.46	0.3	0.23	0.13	0.07	-

Основной особенностью оценки надежности по результатам статистических испытаний – недостаточность данных для точного определения эксплуатационных показателей. Следует отметить, что любое значение искомого показателя, вычисленное на основе ограниченного числа опытов, всегда будет содержать элемент случайности. Такое приближенное, случайное значение показателя называют оценкой показателя.

К оценке параметра v предъявляется ряд требований, которым она должна удовлетворять.

Во-первых, оценка v при увеличении числа опытов n должна приближаться к параметру v . Оценка, обладающая таким свойством, называется состоятельной.

Во-вторых, желательно, чтобы оценка v не обладала систематической ошибкой, т.е. чтобы выполнялось условие

$$M(v) = v.$$

Оценка, удовлетворяющая этому условию, при котором ее математическое ожидание равно оцениваемому параметру, называется несмещенной.

В-третьих, выборная несмещенная оценка должна обладать по сравнению с другими наименьшей дисперсией, т.е.

$$D(v) = \min.$$

Оценка, обладающая таким свойством, называется эффективной.

На практике не всегда удается удовлетворять перечисленным требованиям. Однако выборке оценки всегда должно предшествовать ее критическое рассмотрение с указанных выше точек зрения.

Пусть имеется случайная величина X с математическим ожиданием Mx и дисперсией Dx , которые неизвестны. Над величиной X проведено n независимых опытов, давших результаты $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$.

В качестве оценки для математического ожидания берется среднее арифметическое наблюдаемых значений случайной величины. В качестве оценки для дисперсии берется статистическая дисперсия.

На практике часто требуется не только найти статистическое ожидание Mv и дисперсию Dv для параметра v , но и оценить их точность и надежность. Требуется знать, к каким ошибкам может привести замена параметра v его точечной оценкой \hat{v} и с какой степенью уверенности можно ожидать, что ошибки не выйдут за определенные пределы.

Для характеристики точности и надежности оценки \hat{v} пользуются так называемыми доверительными интервалами и доверительными вероятностями.

Пусть для параметра v получена из n опытов несмещенная оценка \hat{v} . Оценим вероятность, при которой допущенная при этом ошибка не превысит некоторой величины ϵ . Обозначим вероятность

$$P(\epsilon) = P(|\hat{v} - v| < \epsilon).$$

Это есть вероятность того, что истинное значение v будет заключаться в пределах $v - \epsilon, v + \epsilon$.

Вероятность $P(\epsilon)$ называется доверительной вероятностью, границы $v - \epsilon, v + \epsilon$ – доверительными границами, интервал $I_\epsilon = v - \epsilon, v + \epsilon$ – доверительным интервалом. Доверительный интервал характеризует

точность полученного результата, а доверительная вероятность – его надежность.

Пример

В результате испытаний мультивибраторов получены следующие значения выходного напряжения, представленные в табл. К5. Определить математическое ожидание, дисперсию и среднеквадратичное отклонение.

Таблица К 5

U, В	8,45	9,15	9,06	8,33	8,78	9,16	9,22	8,89	9,36	8,66
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Определяем математическое ожидание

$$M(X) = 1/10 [8,45 + 9,15 + 9,06 + 8,33 + 8,78 + 9,16 + 9,22 + 8,89 + 9,36 + 8,66] = 8,906 \text{ В.}$$

Определяем дисперсию:

$$D(x) = 1/10 [(8,906 - 8,45)^2 + (8,906 - 9,15)^2 + (8,906 - 9,06)^2 + (8,906 - 8,33)^2 + (8,906 - 8,78)^2 + (8,906 - 9,16)^2 + (8,906 - 9,22)^2 + (8,906 - 8,89)^2 + (8,906 - 9,36)^2 + (8,906 - 8,66)^2] = 0,1064 \text{ В}^2.$$

Получим значение среднеквадратичного отклонения

$$\sigma(x) = 0,326 \text{ В.}$$

При изучении степени отклонения значений какого-либо параметра статистически однородных изделий практически невозможно и экономически нецелесообразно исследовать каждый объект изучаемой совокупности. Поэтому из всей совокупности однородных объектов, называемой *генеральной*, отбирают случайно определенное количество, называемое *выборкой*. Число объектов в выборке называют *объемом выборки*.

Пусть для получения некоторого количественного признака из генеральной совокупности извлечена выборка объема n. Значения x_1, x_2, x_n признака X в выборке называют *вариантами*, а последовательность вариант, записанных в возрастающем порядке - *вариационным рядом*.

Для ускорения расчетов и предупреждения ошибки необходима предварительная обработка данных, полученных в результате измерений.

Выборочные данные иногда могут содержать резко отклоняющиеся результаты, так называемые *выскакивающие варианты*. Они являются, как правило, следствием грубой ошибки в проведении эксперимента или измерения, оставшейся незамеченной. Здесь рассматривается очень быстрый способ выявления выскакивающих вариантов, основанный на оценке различий крайних вариантов вариационного ряда, который позволяет с достаточной строгостью решить эту задачу.

Пусть имеем выборку объема n , данные которой представлены в виде вариационного ряда $x_1 x_2 \dots x_i \dots x_n$. Для проверки варианта, относительно которых можно предположить, что они являются выскакивающими, следует вычислить отношения, представленные в табл. К 6. Отношение $\frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_2}$ вычисляется, когда резко отклоняющейся является наибольшая варианта.

Таблица К 6

Объем выбор- ки	Уровень значимости					
	0,05			0,01		
	$\frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1}$	$\frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_2}$	$\frac{x_n - x_{n-2}}{x_n - x_1}$	$\frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1}$	$\frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_2}$	$\frac{x_n - x_{n-2}}{x_n - x_1}$
	$\frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1}$	$\frac{x_2 - x_1}{x_n - x_2}$	$\frac{x_3 - x_1}{x_n - x_1}$	$\frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1}$	$\frac{x_2 - x_1}{x_n - x_2}$	$\frac{x_3 - x_1}{x_n - x_1}$
3	0,941	1	1	0,998	1	1
4	0,765	0,955	0,967	0,889	0,991	0,992
5	0,642	0,807	0,845	0,78	0,916	0,929
6	0,56	0,689	0,736	0,698	0,805	0,836
7	0,507	0,61	0,661	0,637	0,74	0,778
8	0,468	0,554	0,607	0,59	0,683	0,71
9	0,437	0,512	0,565	0,555	0,635	0,667
10	0,412	0,477	0,531	0,527	0,597	0,632

11	0,392	0,45	0,504	0,502	0,566	0,603
12	0,376	0,428	0,481	0,482	0,541	0,579
15	0,338	0,381	0,43	0,438	0,486	0,522
20	0,3	0,334	0,372	0,391	0,43	0,464
24	0,281	0,309	0,347	0,367	0,4	0,434
30	0,26	0,283	0,322	0,341	0,369	0,402

Отношение $\frac{x_2 - x_1}{x_n - x_2}$ вычисляется, когда "подозреваемой" является

наименьшая варианта. Отношения, представленные во втором и третьем столбцах табл. К 6, могут использоваться в некоторых случаях для повышения эффективности проверки. Так, отношение $\frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_2}$

эффективнее выявлять высказывающую варианту, когда предлагаются высказывающими сразу две варианты - наибольшая и наименьшая.

Отношение $\frac{x_2 - x_1}{x_n - x_2}$ используется для проверки наименьшей вари-

анты, когда подозреваемыми являются наибольшая и наименьшая варианты.

Отношение $\frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1}$ служит для проверки наибольшей варианты,

когда предполагаются высказывающими сразу две наибольшие варианты. Отношение $\frac{x_3 - x_1}{x_n - x_1}$ вычисляется для проверки наименьшей вариан-

ты, когда "подозреваемыми" являются две наименьшие варианты.

Затем нужно сравнить вычисленные значения отношений с соответствующими табличками для данного объема выборки n и уровней значимости $\alpha = 0.05; 0.01$.

В общем случае под уровнем значимости в математической статистике понимают вероятность принятия ошибочного решения. Здесь это вероятность того, что мы ошибочно исключим проверяемую в I варианте, хотя в действительности она не является грубой ошибкой эксперимента,

т. е. фактически эта варианта характерна для изучаемой генеральной совокупности.

Если хотя бы одно из трех вычислительных отношений превышает соответствующее табличное значение, это уже дает право на безоговорочное исключение крайней варианты. Если каждое из трех вычисленных значений меньше соответствующего табличного, то проверяемая крайняя варианта не может быть значимости 0,05 и 0.01. В таком случае нет оснований для безоговорочного вывода об исключении крайней варианты. Можно лишь отметить, что велика вероятность грубой ошибки при получении этой варианты.

Высказывающую варианту необходимо исключить из всех последующих операций по статистической обработке.

Список использованной литературы

1. Зеленский, А.В. Моделирование процессов при проектировании ЭС: учеб. пособие для вузов / А.В. Зеленский, Н.В. Ляченков. - М.: Машиностроение, 2000 – 252 с.
2. Баканов, Г.Ф. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств: учеб. пособие / Г.Ф. Баканов, С.С. Соколов, В.Ю. Суходольский; под ред. И.Г. Мироненко. - М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.
3. Основы проектирования электронных средств: учеб. пособие / А.В. Зеленский, В.А. Зеленский, Г.Ф. Краснощекова [и др.]. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2007. - 243 с.
4. Федоров, В. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств / В. Федоров, Н. Сергеев, А. Кондрашин; под ред. В.К. Федорова. – М.: Техносфера, 2005-502 с.
5. Расчет системы амортизации радиоэлектронной аппаратуры: метод. указания / сост. Г.Ф. Краснощекова. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. - 13 с.
6. Разработка конструкторской документации: метод. указания к лабораторным и практическим занятиям / сост. А.В. Зеленский, Г.Ф. Краснощекова. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. – 28 с.
7. Анализ конструкций РЭС: метод. указания к практическим занятиям / сост.: Г.Ф. Краснощекова, В.А. Зеленский. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
1. СТРУКТУРА И КЛАССЫ ЭС	4
1.1. Уровни электронных средств	4
1.2. Классификация электронных средств	9
1.3. Типовые конструкции электронных средств.....	10
2. ВНЕШНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА	15
2.1. Влияние субъективных и объективных факторов на работоспособность ЭС	15
2.2. Влияние температуры на работоспособность ЭС	17
2.3. Влияние атмосферного давления на работоспособность электронных средств	21
2.4. Влияние влаги на работоспособность ЭС.....	23
2.5. Влияние механических воздействий на работоспособность ЭС.....	25
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ.....	29
3.1. Модели процессов и устройств в ЭС.....	29
3.2. Моделирование процессов на основе аналогии.....	32
3.3. Основы моделирования конструкций и технологических процессов производства ЭС.....	34
4. НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ.....	37
4.1. Основные понятия надежности ЭС.....	37
4.2. Расчет надежности при проектировании ЭС.....	41
4.3. Расчет показателей надежности.....	46
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	54
Контрольная работа	54
Список использованной литературы	64

Учебное издание

*Зеленский Анатолий Васильевич
Краснощекова Галина Федоровна*

**ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
Часть 1**

Учебное пособие

Редактор Т.К. Кретинина
Доверстка Т.Е. Половнева

Подписано в печать 26.12. 2008 г. Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 4,25.
Тираж 50 экз. Заказ .

Самарский государственный аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК