

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

А.В. ЗЕЛЕНСКИЙ, Г.Ф. КРАСНОЩЕКОВА

ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА. КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ

Рекомендовано учебно-методическим объединением вузов
Российской Федерации по образованию в области радиотехники,
электроники, биомедицинской техники и автоматизации в
качестве учебного пособия для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по специальности 210201
«Проектирование и технология радиоэлектронных средств»
направления 210200 «Проектирование и технология
электронных средств»

САМАРА
Издательство СГАУ
2010

УДК 681.321 (076.8)

ББК 32.971

3 486

Работа выполнена в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009 – 2010 годы)». Проект № 1120 «Разработка учебно-методического комплекса и экспериментальная обработка образовательной технологии подготовки элитного корпуса специалистов для инновационной деятельности в наукоёмких высокотехнологических отраслях машиностроения».

Рецензенты: канд. техн. наук, доц. А. И. Колпак о в

канд. техн. наук, доц. В. Д. Д м и т р и е в

Зеленский А.В.

3 486

Электронные средства. Конструкции и расчетные модели: учеб. пособие / *А.В. Зеленский, Г.Ф. Краснощекова*. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. - 152с.

ISBN 978-5-7883-0783-1

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 очно-заочной формы обучения специальности 210201 «Проектирование и технология РЭС»

УДК 681.321 (076.8)

ББК 32.971

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

ISBN 978-5-7883-0783-1

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2010

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие охватывает основные разделы дисциплин «Теоретические основы конструирования, технологии и надежности РЭС», «Основы проектирования электронных средств», «Моделирование процессов в РЭС», изучаемых студентами очно-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. УРОВНИ КОНСТРУКТИВНОЙ СЛОЖНОСТИ РЭС

1.1. Введение

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 радиоэлектронных средств. 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...300 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 радиоэлектронные средства (РЭС), 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 РЭС разделяют на уровни: система, комплекс, устройство, узел, что отражено на рис.1.1. Собирательное понятие РЭС объединяет последние два уровня РЭС.

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.

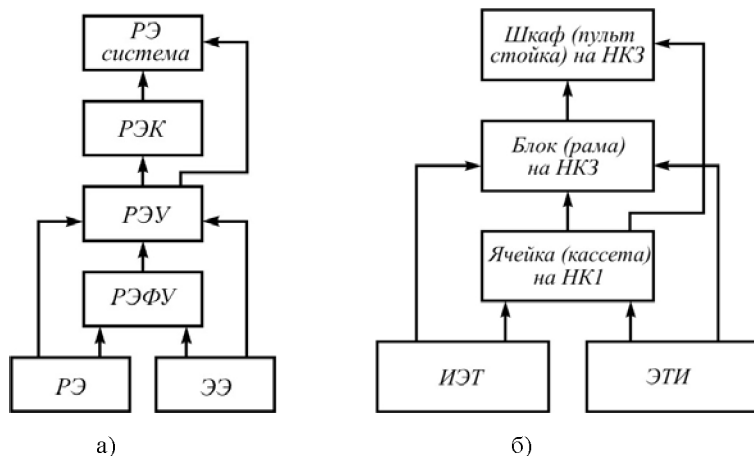


Рис. 1.1. Уровни разукрупнения РЭС:
а) по функциональной сложности; б) по конструктивной сложности

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. РЭС 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 РЭС.

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

Разновидностью радиоэлектронной системы является радиотехническая система, под которой понимают совокупность РЭС 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 радиоэлектронной системы могут присутствовать механические, электромеханические и другие средства, без которых невозможна ее эксплуатация. Эти средства могут входить в РЭС как отдельно, так и внутри радиоэлектронных комплексов или устройств.

Радиоэлектронный комплекс (РЭК) - это РЭС 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 - это РЭС 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 РЭС 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) - это РЭС 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 переменных 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 РЭС 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, пульты 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 РЭС как готовом изделии различают две непосредственно взаимосвязанные части: электрическую схему и конструкцию.

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

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

Конструкция РЭС - есть совокупность ИЭТ, ЭТИ и конструктивных деталей, находящихся в определенной пространственно-механической, информационной и энергетической взаимосвязи, которая обеспечивает выполнение данным РЭС необходимых функций с высокой надежностью.

Надежность - это свойство РЭС 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 РЭС как вид инженерной деятельности есть совокупность работ, выполняемых при создании проекта конструкции аппаратуры. Конструирование РЭС как прикладная научная дисциплина - это обобщение методов анализа и синтеза конструкций. Теоретический фундамент конструирования РЭС 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 РЭС как система научных принципов и общих закономерностей разработки конструкций в электронике.

1.2 . Анализ конструкций РЭС

Радиоэлектронные 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 РЭС представлена на рис. 1.2 (направление связей между признаками указано стрелками). Приведенная классификация достаточно укрупненная, но она позволяет выделить главные отличительные признаки РЭС различных видов.

Пользоваться классификацией следует таким образом. Пусть, например, необходимо знать основные характеристики переносной РЭС 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.

Прогресс в развитии конструкций РЭС характеризуется в настоящее время тремя важными особенностями:

- широкое использование фундаментальных достижений физики твердого тела;
- применение вычислительной техники для решения сложных конструкторских задач;
- создание научных основ проектирования как творческого процесса, которому можно и нужно обучить начинающих и малоопытных.

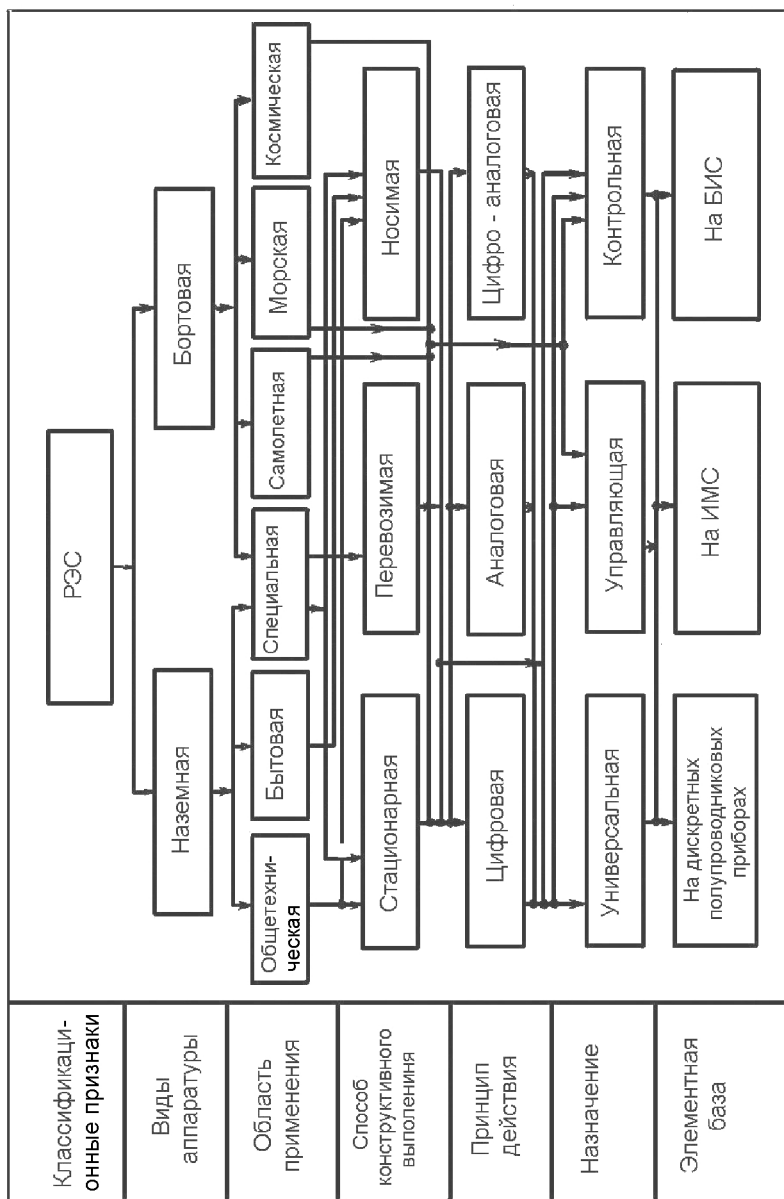


Рис. 1.2. Классификация РЭС

Усложнение задач, решаемых средствами радиоэлектроники, проникновение ее во все новые области человеческой деятельности и связанное с этим усложнение самого РЭС находятся в явном противоречии с повышением требований к массе, габаритам, надежности, стоимости и срокам проектирования РЭС. Разрешение этого противоречия возможно следующими путями:

- упрощение схем РЭС;
- стандартизация и унификация;
- ослабление требований по габаритам, надежности;
- применение вычислительной техники;
- дальнейшее развитие и совершенствование конструирования РЭС и процесса их проектирования в связи с изменениями в технологии, сменой элементной базы и организации производства.

В то же время возможно и наилучшее разрешение указанного выше противоречия за счет поиска лучшего варианта конструкций (по массе, габаритам и т.д.), не ухудшающего других характеристик РЭС в рамках ограничения на сроки и затраты при создании РЭС. Это может быть осуществлено за счет применения различного рода компоновочных процедур в процессе проектирования РЭС, т.е. за счет оптимального проектирования.

Резкое сокращение сроков разработки новых видов РЭС, сроков их промышленного освоения и внедрения в серийное производство возможно следующими путями:

- унификация схемотехнических и конструкторско-технологических решений, обеспечивающих автоматизацию проектирования, изготовления и контроля модулей различной сложности в условиях гибкого автоматизированного производства (ГАП);

- унификация и стандартизация коммутационных и установочных деталей, электрорадиоэлементов (ЭРЭ), интегральных схем (ИС), корпусных и бескорпусных функциональных ИС, больших интегральных схем (БИС), микропроцессорных наборов, типоразмеров печатных плат, модулей блоков и шкафов и их присоединительных размеров;

- типизация технологических процессов изготовления и контроля деталей, ЭРЭ, ИС, печатных плат, модулей и блоков, обеспечивающих механизацию и автоматизацию их производства;

- унификация и стандартизация технологического оборудования;
- использование методов проектирования конструкций РЭС, предназначенных для автоматизированного производства и сборки применительно к ГАП;

- разработка организационной научно-технической документации (НТД), регламентирующей взаимоотношения НИИ и КБ заводов-разработчиков РЭС, технологических НИИ и производственных предприятий-изготовителей на всех этапах создания и оценки ее технологичности, эффективности и качества.

Системный подход к конструированию РЭС позволяет избегать узких односторонних ошибочных представлений, решений, заключений. Примени-

тельно к сложным РЭС сущность системного подхода можно сформулировать в виде ряда основных принципов.

1. Принцип цели. Он состоит в выделении цели из множества целей, достижение которых является результатом функционирования исследуемой системы.

2. Принцип соответствия системы цели. Это принцип состоит в выделении комплекса технических средств, которые рассматриваются как система, в результате функционирования которой должно обеспечиваться достижение цели.

3. Принцип иерархии систем. Выделенная система рассматривается, с одной стороны, как подсистема некоторой суперсистемы, а с другой стороны - как система, состоящая из ряда подсистем.

4. Принцип субоптимальности. Данный принцип состоит в том, что оптимальное поведение системы не требует оптимального (в локальном смысле) поведения подсистем.

5. Принцип иерархии целей. Он состоит в подчинении функционирования системы целям системы более высокого уровня.

Рассматривая процесс конструирования РЭС как системный, необходимо подчеркнуть следующие его особенности:

- сложность и взаимосвязь всего комплекса вопросов конструирования РЭС, приводящие к появлению обратных связей между отдельными этапами конструирования и итерационными процедурами принятия решений;
- многообразие и большой объем конструкторских задач, высокие требования к точности результатов;
- значительная трудоемкость, а следовательно, и длительность выполнения как отдельных решений, так и всей совокупности конструкторских работ;
- трудности многокритериальных задач оптимизации;
- многообразие конструкций РЭС, что дополнительно усложняет модели;
- сложность математического описания взаимосвязанных физических процессов, определяющих функциональные свойства конструкций РЭС.

Следует дополнительно принять во внимание, что РЭС является объектом конструирования, который характеризуется быстрым моральным старением принимаемых решений; РЭС, как правило, является объектом конструирования устойчивой номенклатуры с достаточной частотой поступления технических заданий; синтез конструкции РЭС в САПР-К получает дополнительные, принципиально новые возможности, реализация которых позволяет повысить качество конструирования.

Конструкция РЭС - совокупность деталей с разными физическими свойствами и формами, находящихся в определенной пространственной, механической, тепловой, магнитной и энергетической взаимосвязи, обеспечивающих выполнение заданных функций с необходимой точностью и надежностью в условиях как внешних воздействий, так и внутренних помех, создаваемых

элементами РЭС. Конструкция предусматривает возможность ее повторения в условиях производства. Существующие связи в РЭС представлены на рис. 1.3.

Основное требование к проектированию РЭС состоит в том, чтобы создаваемое устройство было эффективнее своего аналога, т.е. превосходило его по качеству функционирования, степени миниатюризации и технико-экономической целесообразности, а методы конструирования обеспечивали электромагнитную совместимость элементов РЭС. Схема разработки эффективных РЭС представлена на рис. 1.4.

Конструктивное исполнение РЭС определяется условиями эксплуатации и объектом размещения, схемотехнической и конструктивной базами.

По схемотехнической базе РЭС оцениваются номером поколения. Поколение РЭС - совокупность функциональных, конструктивных и технологических показателей определенного вида изделий, разработанных с использованием новых научно-технических достижений в течение одного временного интервала. Конструктивно-технологические показатели РЭС II-V поколений приведены в табл. 1.1.

Т а б л и ц а 1.1. Показатели РЭС

Показатель	Поколение РЭС			
	II	III	IV	V
Элементная база	Полупроводниковые приборы, миниатюрные ЭРЭ	Интегральные схемы	Большие интегральные схемы и сверхбольшие интегральные схемы	Большие гибридные микросборки, БИС, СБИС и изделия функциональной электроники
Степень интеграции изделий, эл/крист.	Дискретные элементы	$10^2 \dots 10^3$	10^4	$10^5 \dots 10^6$
Метод конструирования	Функционально-узловой		Функционально-модульный	
Монтаж	Одно- и двусторонний	Многослойный печатный	Шлейфовый и многослойный печатный	Многослойный
Конструкция блоков	С горизонтальным и вертикальным пассивом	С ячейками, разъемной или книжной конструкции	С ячейками, разъемной или книжной конструкции, в том числе герметичные	

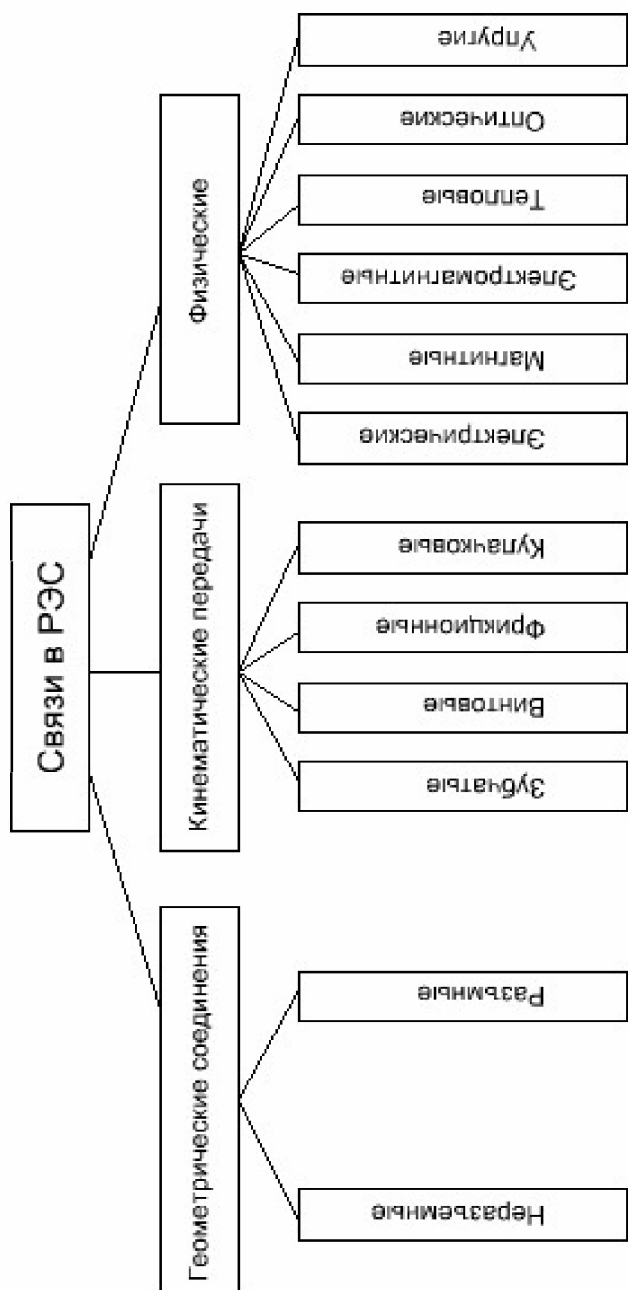


Рис. 1.3. Связи в РЭС

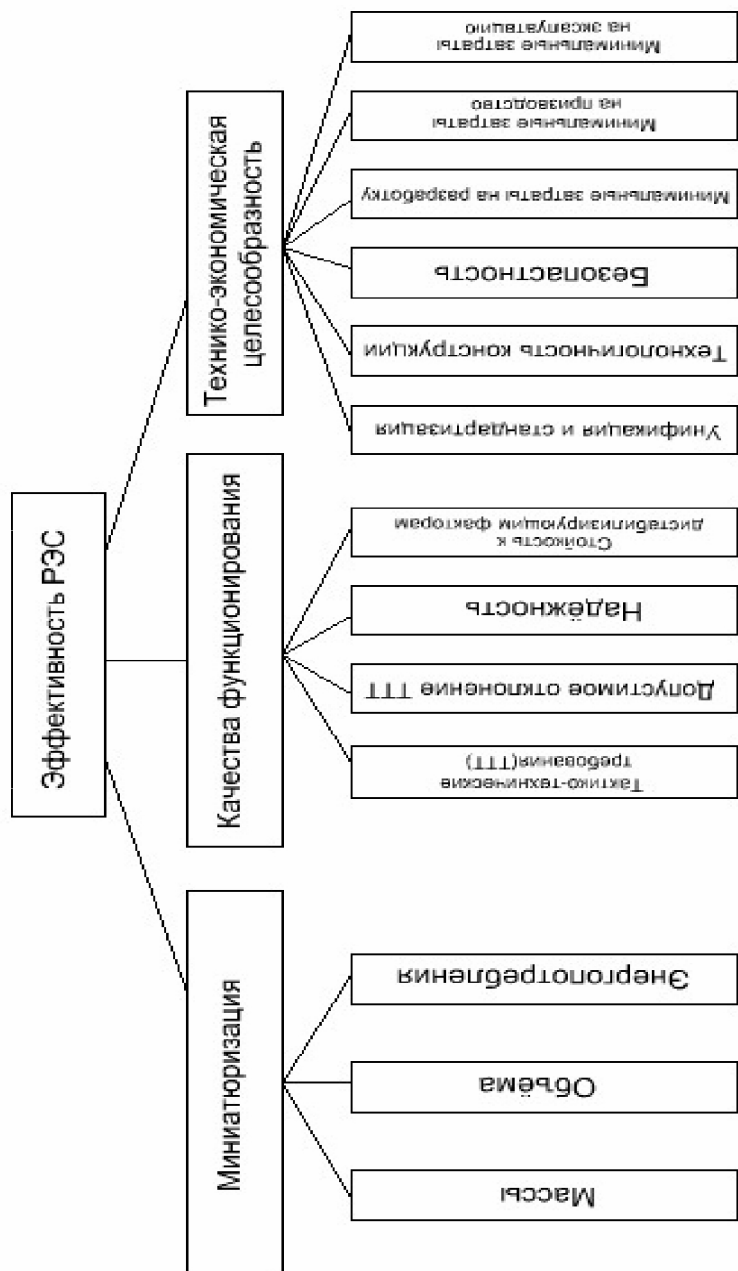


Рис.1.4. Схема разработки эффективных РЭС

По конструктивной базе, под которой понимается совокупность механических элементов конструкции РЭС, обеспечивающих механическую прочность и защиту от дестабилизации воздействий, а также механическое управление аппаратурой, устройства РЭС можно разделить на механические детали и узлы управления, несущие конструкции. Механические детали и узлы управления служат для плавного или скачкообразного, вращательного или поступательного перемещения исполнительных устройств (потенциометры, переключатели и др.).

К ним относятся кнопки, ручки управления, фиксатор, а также отсчетные устройства, с помощью которых определяются значения измеряемой величины визуальным наблюдением.

Несущей конструкцией называется элемент (или совокупность элементов) конструкции, предназначенный для размещения составных частей аппаратуры и обеспечения их устойчивости к воздействиям в заданных условиях эксплуатации. Несущая конструкция обеспечивает необходимое положение ЭРЭ в пространстве, наличие определенных электрических и магнитных связей между ними, защиту от дестабилизирующих факторов условий эксплуатации, а также придает изделию товарный вид.

К несущим конструкциям обычно относят печатные и монтажные платы, рамки, каркасы, шасси и кожухи блоков, рамы, стеллажи, стойки, шкафы, другие детали аналогичного назначения.

Базовая несущая конструкция (БНК) - несущая конструкция, предназначенная для размещения составных частей аппаратуры, габариты которой стандартизованы. Наиболее распространенные ВДК, используемые для компоновки РЭС, рассмотрены в работах [3]. Большой технико-экономический эффект БНК заключается в следующем:

- при разработке новых устройств используется проверенная БНК, исключающая поиски возможных решений и возможные ошибки;
- обеспечивается большая преемственность в производстве устройств, созданных на одной базе;
- значительно ускоряется подготовка производства и снижаются расходы на ее выполнение;
- намного облегчаются условия эксплуатации и ремонта устройств, имеющих много общих конструктивных элементов;
- вокруг базовых (типовых) изделий легко могут создаваться различные модификации (типовые ряды) путем некоторых изменений типового изделия.

Показатели качества РЭС. Одной из основных проблем конструкторского проектирования РЭС является выбор показателей качества оценки оптимальности конструкции модулей. Правильный выбор показателей качества эквивалентен формулировке задачи конструкторского проектирования. Укрупненно связь конструкции РЭС с показателями качества показана на рис. 1.5.

В настоящее время используют следующие показатели качества РЭС:

- функционирование, характеризующее полезный эффект от использования РЭС по назначению, область их применения;
- надежность, определяющая свойство РЭС сохранять свою работоспособность во времени;
- технологичность, характеризующая эффективность конструкторско-технических решений для обеспечения высокой производительности труда при изготовлении и ремонте РЭС;

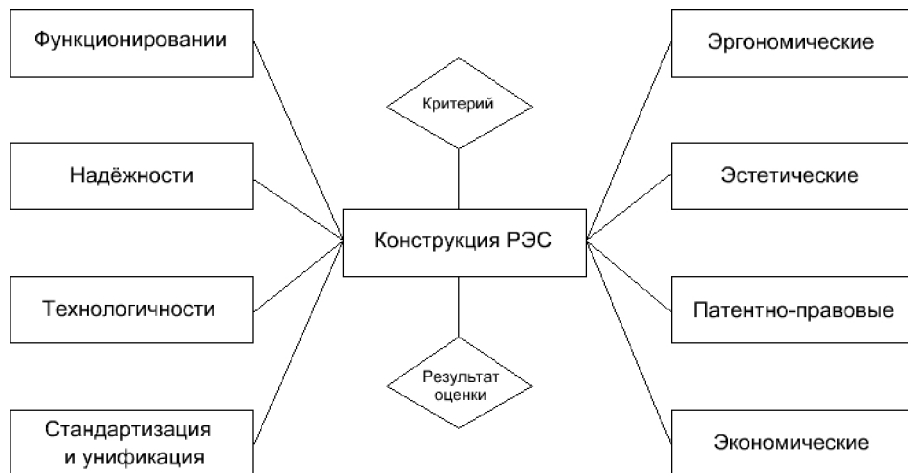


Рис. 1.5. Связь конструкции РЭС с показателями качества

- эргономические, характеризующие систему "человек - изделие - среда" и учитывающие комплекс гигиенических, антропологических, физиологических, психофизиологических и психических свойств человека, проявляющихся в производственных и бытовых условиях;
- эстетические, характеризующие внешние свойства РЭС; выразительность, оригинальность, гармоничность, целостность, соответствующие среде и стилю и т.д.;
- стандартизация и унификация, характеризующие степень использования в РЭС стандартизованных изделий и уровень унификации их составных частей;
- патентно-правовые, отражающие степень патентной защиты конструкторских решений в РФ и за рубежом, а также ее патентную чистоту;
- экономические, характеризующие затраты на разработку, изготовление, эксплуатацию РЭС, а также экономическую эффективность эксплуатации.

Следует подчеркнуть, что только учет всего многообразия факторов, их тщательный анализ дают основание конструктору выбрать из большого числа возможных вариантов решение, близкое к оптимальному [9].

Показатели качества - это комплекс критериев, используемых для оценки принимаемых решений на различных этапах создания РЭС. Из-за специфики условий эксплуатации и производства критерии могут быть различными, что приводит к многовариантности проектных решений.

Увеличение надежности. Проблема надежности для конструктора складывается из решения задач обеспечения нормального теплового режима, защиты аппаратуры от внешних климатических и механических воздействий, воздействий электрических, магнитных и электромагнитных полей. Надежность является сложным свойством, которое в зависимости от назначения конструкции и условий применения состоит из сочетания свойств безотказности, долговечности, сохраняемости, ремонтпригодности (ГОСТ 27.002-83). Первые три свойства основаны на противодействии разрушительным физико-химическим и механическим воздействиям, четвертое - на создании благоприятных условий для предупреждения и обнаружения причин повреждений и их устранения.

Для обеспечения конструктором надежности при разработке необходимо выделить три главных исходных условия [4]:

- выбор ЭРЭ и материалов по техническим условиям (ТУ);
- исключение конструкционных отказов;
- правильность и полнота технологических указаний.

Удовлетворение этих условий начинается с выбора элементов и материалов в точном соответствии с данными, записанными в НТД, основным документом которого является ТУ. При выборе комплектующих ЭРЭ и материалов следует избегать назначения предельных значений параметров, реализуемых поставщиком с наибольшим трудом и потенциально наиболее опасных с точки зрения возникновения отказов при эксплуатации.

Вторым условием является исключение конструкционных отказов. Конструкционным называют отказ, возникший в результате нарушения установленных правил и норм конструирования. Такими нарушениями являются ошибки всех видов: от ошибок в расчетах, в выборе режимов и материалов до ошибок в чертежах и текстовых документах.

Третьим условием является правильное назначение конструктором технологии изготовления. Все ограничения на технологию и допуски на размеры, которые конструктор может предвидеть как влияющие на будущую надежность изделия, должны быть внесены в конструкторскую документацию. Конструкторский документ должен мысленно проследивать весь технологический процесс изготовления разработанной им конструкции и обращать внимание на те операции, где может быть нанесен ущерб надежности.

Улучшение технологичности конструкции. Технологичность конструкции изделия (ГОСТ 18831-73) есть приспособленность к ограниченному расходу

ванию трудовых, материальных и энергетических ресурсов при подготовке производства и промышленном выпуске изделий в заданном количестве по высшей категории качества (производственная технологичность), а также при техническом обслуживании и ремонте (эксплуатационная технологичность).

Проектируя аппаратуру, конструктор должен в максимальной степени обеспечить технологичность деталей, сборочных единиц и РЭС в целом. Обеспечение технологичности конструкции выполняется на всех стадиях разработки РЭС: проектирование принципиальных электрических схем; разукрупнение схем на узлы, блоки, стойки; разработка компоновочных схем и рабочих чертежей; разработка методики сборки, контроля. Для каждого типа и масштаба производства существуют свои требования в пути обеспечения технологичности конструкции.

Стандартизация и унификация. Стандартизация - установление и применение правил с целью упорядочения деятельности в определенной области на пользу и при участии всех заинтересованных сторон, в частности, для достижения всеобщей оптимальной экономии при соблюдении условий эксплуатации (использования) и требований безопасности (ГОСТ 1.0-85). Разновидностями стандартизации являются: ограничения (симплификация), типизация, агрегатирование, унификация. Унификация - основной метод стандартизации, заключающийся в приведении изделий к единообразию на основе установления рационального числа их разновидностей. При этом под изделиями можно понимать как образцы РЭС, так и их составные части. Унифицированные изделия имеют наиболее высокое качество. Под уровнем унификации конструкции понимается насыщенность ее стандартными и заимствованными составными частями: деталь, сборочная единица и т.д. Оценка уровня унификации позволяет:

- значительно сократить сроки и стоимость проектирования и изготовления изделий;
- повысить конструктивную преемственность разработок;
- резко сократить номенклатуру применяемых деталей и сборочных единиц, за счет чего увеличить их применяемость;
- организовать специализированное производство стандартных и унифицированных деталей, сборочных единиц и модулей для централизованного обеспечения всех заинтересованных предприятий;
- упростить обслуживание и ремонт РЭС, так как вышедшие из строя детали и модули могут быть заменены запасными без ухудшения эксплуатационных качеств аппаратуры.

Электромагнитная совместимость (ЭМС) - это способность РЭС одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии на нее непреднамеренных радиопомех другим ра-

диоэлектронным аппаратом (ГОСТ 23611-79). Широкое внедрение радиоэлектроники в различные сферы производства и потребления вызывает рост количества различных РЭС по экспоненциальному закону, что ставит проблему ЭМС на более высокий уровень. Однако разработчики и конструкторы не всегда принимают необходимые меры по обеспечению ЭМС аппаратуры и систем. Наиболее эффективные меры по обеспечению ЭМС должны приниматься на самых ранних стадиях конструирования новых РЭС и отдельных его элементов.

Для обеспечения ЭМС при конструировании любых РЭС необходимо обращать внимание на выбор и расположение отдельных блоков, узлов и устройств, а также на элементы самой конструкции. При компоновке узлов, блоков и устройств, необходимо знать методы заземления, обоснование применения фильтров и их характеристики, взаимное расположение и разнос блоков с учетом ориентации электромагнитных полей, критичность с точки зрения ЭМС, взаимное экранирование и изоляцию. При разработке РЭС необходимо правильно выбирать металл, вид покрытия, метода установки и размещения узлов, а также правильно конструировать несущие конструкции и устройства; элементы установки кнопок, переключателей, тумблеров, индикаторных ламп и других элементов, выходящих на переднюю панель; способы установки и заземления кабелей, разъемов и др.

Эргономика и техническая эстетика. Эргономика - это прикладная наука, которая изучает человека и его деятельность в условиях современного производства с целью оптимизации орудий, условий и процесса труда. Основным объектам исследования эргономики является система «человек - машина - производственная среда». Соблюдение эргономических законов с самого начала разработки любого технического изделия гарантирует повышение культуры производства, удобство и эффективность труда, повышение потребительской ценности промышленной продукции.

Техническая эстетика - наука, изучающая социально-культурные, технические и эстетические проблема формирования гармоничной предметной среды, создаваемой средствами промышленного производства. Требования технической эстетики реализуются методами художественного конструирования, которые позволяют достигнуть единства эстетического и функционально-технического решения оборудования, композиционного единства гармонических форм всех элементов рабочего места; декоративности и гармоничности цветофактурного и цветотекстурного решения поверхностей в условиях определенного освещения; выразительности и декоративности объемных и накладных элементов (шильдиков, знаков и графических обозначений). Форма прибора должна быть технически рациональной, простой, выразительной и экономически оправданной.

Для зрительного восприятия наиболее благоприятной является форма, у которой выдержаны определенные соотношения размеров. Наиболее благоприятными считаются соотношения так называемого "золотого сечения", при котором большая часть отрезка является пропорциональной разнице между всем отрезком и его меньшей частью, т.е. $A/B=B/(A-B)$ или $B=0,618 A$.

Техническое описание изучаемой (проектируемой) конструкции должно быть достаточно подробным, отражающим все основные свойства конструкции с выделением особенностей, требующих улучшения. Описание изучаемых конструкций должно включать следующие пункты:

- назначение прибора, изделия;
- условия эксплуатации;
- элементная база;
- общее конструктивное решение;
- тип несущих конструкций, наличие СТК;
- механическая прочность конструкции;
- защита от внешних воздействий;
- электромагнитная совместимость;
- эргономика и техническая эстетика;
- конструкция лицевой панели и кожуха;
- материалы, из которых изготовлены основные элементы конструкции;
- технологичность конструкции;
- уровень унификации конструкции;
- ремонтпригодность;
- масса и габариты.

Порядок и содержание пунктов описания могут меняться для более полного и объективного отражения особенностей изучаемых конструкций.

1.3. Оценка потребительских свойств РЭС

Потребительские свойства изделий определяются потребностями, особенностями и возможностями человека (оператора), для которого это изделие предназначено, т.е. они относятся к сфере «человеческого фактора».

Существуют сотни и тысячи частных потребительских свойств, которые можно разделить на 4 группы: социальные, функциональные, эргономические и эстетические.

Социальные свойства изделия характеризуют его общественную необходимость, потребность в этом изделии со стороны определенной группы потребителей, т.е. с экономической точки зрения - спрос.

Функциональные свойства характеризуют способность изделия выполнять основные и ряд вспомогательных функций в соответствии со своим на-

значением. Например, основная функция радиоприемного устройства - прием и преобразование электромагнитных сигналов в заданных условиях с заданным качеством.

Эргономические свойства определяют удобство и безопасность эксплуатации изделия, а также оптимизацию всей психической и физической нагрузки человека.

Эстетические свойства характеризуют соответствие изделия эстетическим потребностям человека и общества.

В данной работе рассматривается методика оценки эргономических и эстетических свойств.

Эргономические свойства изделия определяются биологией человека, а именно - особенностями строения тела, физическими возможностями, способностью воспринимать и перерабатывать информацию, принимать решения, выполнять различные действия и т.п. Эргономические свойства рассматриваются в комплексе, в системе «человек-машина-среда». Создание оптимального варианта этой системы даст большой эффект при эксплуатации изделия, выражающийся в повышении надежности, увеличении производительности труда и уменьшении утомляемости человека.

Эргономические свойства подразделяются:

- на гигиенические;
- антропометрические;
- физиологические;
- психофизиологические;
- психологические.

Гигиенические свойства определяются наличием биологически активных технических параметров изделия, оказывающих влияние на здоровье и самочувствие человека. Такими параметрами являются выделение вредных веществ, шум, вибрация, выделение тепла, электромагнитное и радиоактивное излучение и т.п.

Антропометрические свойства - это соответствие изделия анатомическим характеристикам человека, типичным размерам и форме человеческого тела и его отдельных частей. Антропометрические требования предъявляются к размерам и расположению следующих объектов:

- интерьер рабочих мест и кабин;
- рабочие столы и сиденья;
- панели с органами управления и индикации;
- органы управления.

Физиологические свойства исходят из необходимости нормального функционирования внутренних органов человека (систем дыхания, кровообращения) и допустимой мышечной напряженности тела. Большую роль играет ра-

бочая поза человека. Неправильное положение тела приводит к значительным статическим нагрузкам, сдавливанию групп мышц и кровеносных сосудов. Физиологические свойства определяются также усилиями, которые человек прилагает в процессе работы.

Психофизиологические свойства изделия определяют функционирование органов чувств человека, участвующих в восприятии информации от этого изделия в процессе работы. Психофизиологические требования предъявляются в основном к зрительным и слуховым индикаторам изделия. Эти индикаторы должны быть достаточно ярки (слышимы), иметь различные размеры, оптимальные цвета.

Психологические свойства определяются требованиями инженерной психологии. Эта наука изучает особенности информационного взаимодействия человека и техники в системе «человек-машина-среда», умственную деятельность человека, его способность воспринимать информацию, перерабатывать ее и принимать решения. Психологические требования, предъявляемые к технике, имеют целью оптимальное распределение функций между нею и человеком.

Конкретные психологические требования предъявляются к следующим объектам:

- форме средств отображения информации с целью различимости и опознаваемости;
- скорости поступления информации к органам чувств человека;
- характеру и объему информации;
- взаимосвязям между средствами отображения информации и органами управления;
- индикаторам.

Эстетические свойства изделия в отличие от эргономических обусловлены не биологией человека, а его общественной характеристикой - способностью проявлять свою творческую сущность и потребностью в красивых предметах. Эстетические представления общества всегда находятся в развитии, они «привязаны» к определенной ступени истории и поэтому способны устаревать. Современные эстетические представления формируются на основе известных практических достижений - лучших промышленных образцов, а также на основе сложившейся общности вкусов, господствующих стилей и моды.

Комплексным эстетическим свойством является красота, которая проявляется в частных свойствах: выразительность, оригинальность, гармоничность, стилевое единство, композиционное совершенство. Композиционные свойства могут быть выражены целостностью, композиционным равновесием, пропорциями, наличием контраста или нюанса, цветовым решением.

Эстетические требования предъявляются только к тем изделиям, с которыми человек непосредственно взаимодействует в процессе личного или производственного потребления.

Оценка эргономических и эстетических свойств представляет определенные трудности. Эти свойства вполне ощутимы при эксплуатации изделий, но трудно измеримы. Многие частные эргономические и эстетические свойства нельзя оценить количественно. Лишь некоторые эргономические характеристики определены государственными стандартами и имеют количественные характеристики. Например, антропометрические требования (размеры столов, сидений, зон видимости, зон досягаемости, размеров органов управления), физиологические требования (требования к рабочей позе, усилия нажатия кнопок и других органов управления), психологические (требования к различным индикаторам, надписям).

Методика эргономической и эстетической оценки изделий не регламентируется государственными нормативными документами. Основным методом, применяемым при анализе потребительских свойств изделий, является экспертный метод. При этом оценку выполняют один или несколько экспертов, обладающих достаточным опытом практической работы в проведении такой экспертизы, а также хорошо изучивших отечественные и зарубежные изделия-аналоги. Используется специально разработанная система контрольных вопросов, охватывающая все анализируемые показатели. На основании ответов на эти вопросы выявляются положительные свойства, отмечаются недостатки, и выносится общее суждение о потребительских свойствах изделия.

Для оценки этих свойств должны быть даны ответы на ряд вопросов.

Гигиенические свойства. Является ли прибор источником электромагнитного излучения, вибрации, повышенного уровня шума?

Существует ли опасность ожогов при прикосновении к прибору?

Нужны ли средства защиты от вредных воздействий со стороны прибора?

Антропометрические свойства. Имеют ли органы управления размеры и форму, соответствующие строению руки человека?

Кнопки должны иметь круглую или прямоугольную форму, с вогнутой поверхностью, соответствующей форме пальца. Размер кнопок 10-12 мм, ход кнопки 3-4 мм. Поворотные ручки должны иметь диаметр 25-40 мм, высоту 20 мм. Селекторные переключатели должны иметь плоскую поверхность той части, которая захватывается рукой. Тумблеры должны иметь достаточную поверхность для захвата рукой [8], на их рабочих поверхностях не должно быть острых граней. Поверхности всех органов управления должны обеспечивать достаточное трение между ними и рукой. Поворотные ручки должны иметь насечку.

Не задевает ли рука оператора соседние органы управления? Расстояние между органами управления должно быть достаточным, чтобы не было слу-

чайного нажатия или сдвига соседних органов. Расстояние между кнопками должно быть 15-25 мм. Концы тумблеров, находящихся во встречном положении, должны отстоять друг от друга на 20 мм.

Позволяет ли конструкция прибора располагать его так, чтобы передняя панель была перпендикулярна нормальной линии взора?

Нормальной линией взора называется линия взора в вертикальной плоскости, проходящая под углом 15° ниже линии горизонта.

Правильно ли расположены наиболее важные и аварийные органы управления на передней панели?

Названные органы управления должны находиться в зоне удобной досягаемости для правой руки.

Правильно ли расположены стрелочные приборы и экраны электронно-лучевых трубок?

Эти индикаторы должны располагаться в оптимальной, центральной зоне видимости. Допустимый угол рассматривания их сбоку не должен превышать 45° , иначе изображение на экране будет восприниматься искаженным, а при считывании показаний стрелочных приборов появится ошибка вследствие параллакса.

Обеспечивает ли конструкция прибора удобство подключения кабелей?

Насколько легко осуществляется замена неисправных деталей и узлов?

Физиологические свойства. Допустимы ли усилия, прилагаемые при манипулировании органами управления?

Кнопки и тумблеры легкого типа должны иметь усилие 0,5 кг, тяжелого типа - 2,5 кг.

Не возникают ли статические напряжения мышц из-за неудобного расположения органов управления и разъемов для подключения кабелей?

Правильно ли выбраны органы управления с учетом выполняемых движений?

Физиологическим особенностям человека наиболее отвечают плавные круговые движения. Вращательные движения в 1,5 раза быстрее поступательных. Самое экономное движение - толчок от себя. Наибольшей скоростью обладают движения сверху-вниз.

Психофизиологические свойства. Хорошо ли различимы индикаторы на передней панели прибора? Имеют ли они достаточные размеры, яркость, читаемость?

Имеют ли цифровые индикаторы цвет свечения оптимальной цветовой гаммы (зеленый или ахроматический)?

Психологические свойства. Правильно ли выбраны типы индикаторов в зависимости от вида считываемой информации?

Для количественного считывания информации (ответ на вопрос «сколько?») применяются цифровые индикаторы.

Для качественного считывания информации (ответ на вопрос «увеличилось или уменьшилось?») применяют стрелочные приборы с подвижным указателем и неподвижной шкалой.

Для контрольного считывания (ответ на вопрос «да-нет», «в норме-не в норме») применяют световые индикаторы (светодиод, световое табло) или стрелочный индикатор с выделенным сектором на шкале.

Для установки заданной величины предпочтительны подвижные указатели с неподвижной шкалой.

Достаточно ли легко читаются показания индикаторов?

Не требуется ли выполнение сложных количественных и логических преобразований показаний индикаторов?

Не содержит ли шкала стрелочного прибора лишние сведения, не относящиеся к измеряемому параметру (например, год выпуска, класс точности, фирменный знак и т.п.)?

Правильно ли расположены цифры отсчета на шкалах стрелочных приборов?

Цифры отсчета должны быть расположены вертикально и не перекрываться стрелкой. Цифры должны возрастать по часовой стрелке.

Правильно ли расположены стрелки отсчета на подвижных шкалах? Цифры отсчета должны быть ориентированы так, чтобы при приближении к неподвижному указателю они располагались вертикально. Направление возрастания чисел отсчета должно быть по часовой стрелке в случае количественного считывания и против часовой стрелки в случае качественного считывания.

Имеется ли на приборе индикация включения сети?

Элемент индикации включения сети быть желтого или белого цвета. Допускается отсутствие специального элемента включения сети в случае, если при включении прибора в сеть на передней панели светятся другие индикаторы.

Имеют ли электронно-лучевые трубки на передней панели достаточную яркость свечения линий, разрешающую способность, яркостный детальный контраст? Не возникают ли блики из-за большого коэффициента отражения экрана?

Правильно ли выбраны органы управления в зависимости от выполняемой функции?

Для оперативной работы предпочтительны кнопки, для эпизодической – тумблеры. Селекторные переключатели можно применять только в случаях, когда отсутствует необходимость быстрого перехода из одного положения в другое, минуя промежуточные положения.

Соответствует ли выполняемым действиям с органами управления привычный эффект:

вправо, вверх, по часовой стрелке - включение, увеличение, движение вперед и по часовой стрелке;

влево, вниз, против часовой стрелки - выключение, уменьшение, движение против часовой стрелки?

Позволяет ли конструкция органов управления определить имеющуюся ситуацию (включено, выключено, в каком положении)?

При нажатии кнопки должен быть слышимый или осязаемый щелчок. При переключении тумблера и селекторного переключателя должен ощущаться перепад величины упругого сопротивления и слышаться щелчок. Селекторный переключатель должен иметь стопоры в начале и в конце диапазона. На торцевой поверхности поворотной ручки должен быть указатель (риска), по которому можно определить положение ручки.

Правильно ли расположены органы управления, применяемые только для подстройки, калибровки и других эпизодических операций?

Такие органы управления должны размещаться отдельно от оперативных органов управления или должны быть изолированы от оператора специальными крышками, скобами.

Правильно ли расположены органы управления и функционально связанные с ними индикаторы?

Такие органы управления и индикаторы должны быть расположены вблизи друг от друга функциональными группами таким образом, чтобы орган управления и рука человека не закрывали индикатор.

Соответствует ли нумерация элементов (например, ряда кнопок) стереотипу чтения «слева-направо, сверху-вниз».

Применяется ли цветовое кодирование органов управления и других элементов для выделения функционального назначения [4]? Правильно ли применяются «цвета светофора» для обозначения функции (зеленый - разрешение, желтый - внимание, красный - запрещение, опасность)?

Правильно ли выполнены надписи, относящиеся к органам управления и индикаторам?

Надписи должны быть нанесены горизонтально, вертикальное расположение не допускается. Надпись должна находиться над соответствующим элементом; исключение составляют приборы, находящиеся выше уровня глаз, в этом случае надписи выполняются под элементами. Надписи должны быть понятными, не требующими дополнительной расшифровки. Сокращения допускаются только общепринятые. Надпись должна содержать наименование регулируемого или измеряемого параметра, а не наименование прибора, например, «напряжение», а не «вольтметр».

Правильно ли выполнены надписи, нанесенные непосредственно на органы управления?

Надписи на органах управления, нанесенные краской, быстро стираются от многократного прикосновения руки человека, поэтому они должны быть выполнены гравированием с последующим заполнением углублений краской.

Не имеются ли на лицевой панели прибора надписи и обозначения (заводской номер, фирменный знак и т.п.), не относящиеся непосредственно к работе оператора?

Правильно ли расположены на передней панели прибора зоны индикации, управления, подключения?

Зона индикации должна располагаться сверху или слева, зона управления - ниже или правее зоны индикации, а зона подключения - ниже или правее зоны управления.

Эстетических свойства приборов. Соответствует ли прибор современному уровню требований по форме и стилю?

Радиоаппаратура специального назначения, измерительная и вычислительная техника в настоящее время выпускаются в виде блоков простой прямоугольной формы светлых ахроматических тонов.

Создается ли впечатление закономерности расположения элементов органов управления, элементов индикации, надписей на передней панели? Не имеет ли место хаотичность и беспорядочность?

Закономерность расположения элементов зрительно может быть выражена следующими средствами: симметрия в расположении элементов или групп элементов относительно центра, повторение одинаковых элементов с одинаковым шагом, совпадение осей элементов, контуров, кратность размеров, геометрическое подобие и т.п.

Ясен ли принцип построения передней панели - симметрия или асимметрия? Не нарушают ли отдельные несимметричные элементы общий принцип симметрии (если господствует симметрия)? Не нарушается ли принцип композиционного равновесия при асимметричном построении передней панели?

Воспринимается ли прибор и его передняя панель как единое целое и не распадаются ли они зрительно на отдельные части?

Целостностью обладают изделия, в которых отдельные части и элементы выполнены в едином стиле и имеют не только механическое соединение между собой, но и видимые и понятные связи друг с другом при работе оператора.

Обладает ли передняя панель прибора свойством композиционного равновесия?

Композиционное равновесие - это зрительное впечатление равновесности формы при равномерном расположении элементов на передней панели. Композиционное равновесие нарушается, если имеются перегруженные элементами участки передней панели и одновременно пустые места в другом.

Можно ли выделить главный элемент на передней панели (цифровое табло, шкала измерительного прибора, экран электронно-лучевой трубки и т.п.)? Имеется ли зрительная связь главного и второстепенных элементов?

Создается ли впечатление масштабности прибора, т.е. соразмерности с человеком?

Изделие считается масштабным, если указатели масштаба (ручки, кнопки, шкалы) имеют форму и размеры, характерные и привычные для использования человеком. В этом случае выполняется принцип «человек есть мера всех вещей». Слишком большие, больше привычных размеры органов управления делают форму крупномасштабной, слишком маленькие - мелкомасштабной.

Обладает ли композиция передней панели свойством контраста?

Если контраст полностью отсутствует, то форма выглядит незаметной и невыразительной, «композиции не на чем держаться».

Контраст может быть выражен следующим образом:

- противопоставление темных элементов и светлого фона (прямой контраст) или в обратном сочетании (обратный контраст);
- противопоставление размеров, например, крупный главный элемент (экран) и мелкие элементы управления;
- применение различного расположения групп элементов, например, горизонтальные и вертикальные ряды кнопок;
- различная обработка поверхностей, например, шероховатая поверхность необработанного литья и шлифованная поверхность.

Соблюдена ли мера контраста?

Чрезмерный контраст приводит к зрительному впечатлению нарушения целостности, к появлению «визуального шума» и к утомлению оператора.

Правильно ли выбрано цветовое решение прибора и его передней панели? Для аппаратуры специального назначения, измерительных и лабораторных приборов рекомендуются ахроматические тона или коричневая гамма цветов. Цвет бытовой аппаратуры определяется господствующим стилем, модой. Окраска прибора может быть выполнена в два или три цвета - основной и дополнительные - для разделения функциональных групп. Мелкомасштабные изделия рекомендуется окрашивать в один цвет для зрительного увеличения размеров, а крупномасштабные - в несколько тонов для зрительного уменьшения размеров.

Хорошо ли видно наименование прибора? Выделяется ли эта надпись среди остальных по своему размеру, расположению, цвету?

Тщательно ли выполнены надписи над органами управления, индикации и подключения? Выдержано ли их расположение строго по оси соответствующего элемента? Достаточна ли степень контраста между надписями и фоном?

Тщательно ли обработаны поверхности прибора? Имеются ли микронеровности, заусенцы? Заметны ли зазоры в местах соединения деталей корпуса, грубо выполненные стыки?

Имеются ли на передней панели крепежные детали (головки винтов), нарушающие общую закономерность расположения элементов и отвлекающие оператора?

Требование уменьшения массы и габаритов современных ЭС, особенно специальных, является исключительно важным в связи с большой функциональной сложностью аппаратуры. Однако возможности уменьшения габаритов конструкции тесно связаны с рассмотренными требованиями компоновки. Совершенно очевидно, что с уменьшением габаритов узла, блока и прибора увеличивается плотность заполнения объема конструкции, что увеличивает вероятность возникновения в конструкции паразитных взаимосвязей, ухудшает тепловой режим и технологичность монтажа и сборки, усложняет доступ к отдельным элементам, узлам для контроля и обслуживания.

Основная задача конструктора при компоновке - найти такое компромиссное решение, при котором в наибольшей мере можно удовлетворить всем рассмотренным выше основным требованиям.

1.4. Конструктивная иерархия и основные направления конструирования электронных средств

Любое ЭС имеет законченную конструкцию, представляющую собой сложную композицию, составленную из большого числа конструктивных единиц. Такая композиция создается человеком с учетом большого количества требований, предварительным объединением более простых конструктивно законченных единиц (отдельных дискретных элементов, интегральных микросхем, модулей) в более сложные.

Конструкцию современных ЭС следует рассматривать как некоторое структурное образование, отдельные части которого находятся в иерархической соподчиненности, что подразумевает усложнение конструкции последовательным объединением более простых конструктивно законченных единиц (отдельных дискретных элементов, интегральных микросхем, модулей) в более сложные.

Если по уровням функциональной сложности ЭС можно разделить на ЭС или комплекс, радиоустройство, блок, субблок или функциональный узел, то такое деление возможно и по ее конструктивным уровням.

По сложности уровня компоновки конструкции подразделяют на системы, многоблочные монтажные устройства (стойки, шкафы, стеллажи, рамы), блоки, функциональные ячейки и элементный базис. Таким образом, можно говорить о существовании пяти структурных уровней компоновки: нулевой, I, II, III, IV.

Самый низкий структурный уровень - нулевой - называют элементным базисом ЭС. Элементный базис ЭС составляют все конструктивно неделимые радиоэлементы общего применения: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, линии задержки, полупроводниковые и электронные приборы,

ИС и компоненты и т. д. Одни элементы нулевого уровня, чтобы иметь какой-либо функциональный признак, объединяют в схемные сочетания (резисторы, конденсаторы и т. п.), а другие (например, ИС) уже имеют функциональный признак.

I структурный уровень - функциональная ячейка (ФЯ), на общем несущем основании которой komponуются элементы нулевого уровня и элементы коммутации и контроля. В качестве несущих оснований функциональных ячеек чаще всего применяются печатные платы, металлические рамки и листы. Названием ФЯ заменены названия I уровня конструкции - модуль, субблок, ТЭЗ и т. д. ФЯ, как правило, является функционально и конструктивно завершенной сборочной единицей: у нее есть свои выходы, присоединительные и кодовые элементы, маркировочная планка, контрольные гнезда и т. д. В общем случае ФЯ состоит из одной платы, но при необходимости может иметь две.

II структурный уровень - это блоки, компоновка которых осуществляется путем сборки ФЯ в пакеты и корпусирование пакетов в блоки. Название блок заменяет существующие названия II структурного уровня - прибор, контейнер и др. В блоке содержится от одной до десятков ФЯ, он обязательно является конструктивно и функционально законченным изделием со всей текстовой документацией.

III структурный уровень составляют монтажные устройства, в которых блоки komponуются в общем несущем основании. Таким основанием для бортового ЭС может служить общая амортизационная рама или стеллаж для стационарной аппаратуры - шкафы, стойки и пульта. В соответствии с компоновкой монтажное устройство может иметь несколько частных названий - индивидуальная и групповая рамы, стеллаж (открытый со всех сторон шкаф), стойка (шкаф без двери и без своей лицевой панели), шкаф (когда есть двери и своя лицевая панель), пульт и др.

Монтажное устройство имеет полное функциональное и конструктивное завершение и служит для электрического объединения нескольких блоков и для сопряжения их с несколькими носителями. При этом конструктивно, как правило, два размера монтажного устройства - глубина и высота - являются постоянными.

IV структурный уровень составляет система, которая служит для объединения ряда монтажных устройств на объекте. Монтажные устройства могут быть разбросаны по разным помещениям или отсекам и к тому же конструктивно чаще всего бывают различными: пульт, стойка, рама, прибор.

Может быть другое деление на уровни, включающее в себя меньшее или большее количество структурных уровней конструкции.

Появление дополнительных структурных уровней (например, модули) ведет к увеличению связей, переключений и ухудшает надежность и технологичность конструкции. Сокращение структурных уровней конструкции, на-

оборот, ведет к лучшему заполнению шкафов и уменьшению связей (например, минуя II структурный уровень, когда монтажное устройство в виде рам с монтажными панелями заполняется сразу функциональными ячейками, как это происходит в стационарных ЭВМ). Количество структурных уровней в конструировании кроме функциональной сложности устройства определяется элементным базисом.

Элементный базис в ЭС значительно изменился. Сначала элементный базис составляли только дискретные схемные элементы, в том числе электродные лампы, на смену которым пришли полупроводниковые приборы. Затем появились полупроводниковые и гибридные ИС. Интегральная микросхема является неделимой конструктивной единицей, изготовленной групповыми технологическими методами, и, как правило, представляет собой не только конструктивно, но и функционально законченный узел. Поэтому в данном случае в элементный базис оказались заложенными функциональные признаки, в то время как до появления ИС эти признаки формировались в первом структурном уровне при объединении дискретных элементов в схемные сочетания. Например, для конструктивного выполнения схемы триггера транзисторы, резисторы и конденсаторы надо расположить на общем основании и выполнить электрический монтаж схемы. В таком исполнении триггер конструктивно представляет собой первый структурный уровень конструкции. Но если в качестве нулевого структурного уровня использовать ИС, представляющую собой триггер, то в первый структурный уровень войдет более сложное устройство и количество структурных уровней в конструкции уменьшится.

С появлением ИС элементный базис стали характеризовать степенью интеграции. При этом различают элементную и функциональную интеграции. Под элементной понимают такое объединение дискретных компонентов в одном твердом теле, при котором каждому элементу соответствует определенный объем твердого тела, а под функциональной - объединение схемных функций элементов, при котором невозможно выделить тот или иной объем твердого тела, выполняющий функции какого-либо элемента.

В ГОСТ 17021-75 различают ИС по степени интеграции: 1-я - до 10 элементов, 2-я от 10 до 100 элементов, 3-я - от 100 до 1000 элементов, 4-я - свыше 1000 элементов, 5-я - свыше 30 000 элементов.

Микросхемы 1...5-й степеней интеграции также соответственно называют: ИС малого уровня интеграции - для 1-й степени интеграции; ИС среднего уровня интеграции - для 2-й и 3-й степеней интеграции, большие интегральные схемы - для 3-й и 4-й степеней интеграции, сверхбольшие интегральные схемы - для 5-й степени интеграции.

Увеличение степени интеграции ИС дает возможность повышать качественные показатели и надежность ЭС при меньших затратах. Повышение на-

дежности ЭС достигается благодаря уменьшению числа технологических операций и внешних соединений. Снижение стоимости ЭС обуславливается уменьшением объема монтажно-сборочных работ.

Если элементный базис составляют конструктивно неделимые элементы, то остальные структурные уровни конструкций всегда являются сборными, к ним относятся функциональные узлы, блоки, шкафы, рамы.

Деление конструкции на структурные уровни позволяет: снизить брак в производстве за счет увеличения степени интеграции неделимых узлов; организовать параллельное изготовление различных узлов, что сокращает производственный цикл изделия и облегчает организацию контроля в процессе производства; обеспечить ремонтпригодность при эксплуатации.

Конструкция современных ЭС является, прежде всего, результатом эволюции элементного базиса, которая повлекла за собой изменение методов компоновки и характера структурных уровней в конструкции. При компоновке преследуется цель максимально использовать высокие качества элементной базы. С увеличением степени интеграции уменьшается число монтажных соединений, увеличивается плотность компоновки, уменьшается масса и объем устройства. Все большее количество соединений переходит внутрь самой микросхемы, и сложность конструкции как бы переходит в сложность элементного базиса.

За период развития ЭС произошла смена трех поколений. Основными отличительными признаками поколения ЭС считаются элементный базис и метод конструирования: в первом поколении - электронная лампа, крупногабаритные навесные электрорадиоэлементы и блочный метод конструирования; во втором - транзистор, миниатюрные электрорадиоэлементы и модульный метод конструирования; в третьем - ИС с небольшой степенью интеграции и функционально-узловой метод конструирования; в четвертом (современная аппаратура) - БИС и СБИС, функциональные компоненты и функционально-узловой метод конструирования с применением микросборки.

Первое поколение ЭС характеризовалось мелкоблочной конструкцией с применением реле, электронных ламп и крупногабаритных элементов, не предназначенных для печатного монтажа. Компоновка осуществлялась на едином блочном шасси, где невозможно параллельное изготовление и применение средств автоматизации. Контактрование осуществлялось пайкой, монтаж - объемным проводом. Достигнутый уровень быстродействия составлял 10^3 опер/с.

Аппаратура второго поколения, выполненная на основе транзисторной техники и печатного монтажа, в конструктивном отношении реализована модульным методом, при котором базовым схемным элементом стал ФУ, что позволяло увеличить надежность, эксплуатационные характеристики аппара-

туры, освоить серийный выпуск унифицированных ФУ. Процесс унификации и стандартизации параметрических рядов ФУ, их формы, габаритов и типов соединений привел к созданию конструкций в виде модулей различного типа (этажерочных, плоских, микромодулей), это открывало путь к параллельному изготовлению и проектированию. Конструкция мелко- и среднеблочная, контактирование пайкой, двусторонние печатные платы, но печать с малыми возможностями, а установка на печать разновысотных элементов (этажерочные модули и электрорадиоэлементы) вела к большим потерям объема. Достигнутый уровень быстродействия составлял 10^4 опер/с.

Аппаратура третьего поколения выполняется на основе корпусированных полупроводниковых и гибридных ИС малой и средней степеней интеграции, миниатюрных электрорадиоэлементов и многослойных печатных плат, что позволяет уменьшать массогабаритные характеристики аппаратуры (при тех же функциональных задачах) и существенно повышать надежность ЭС. Конструкция среднеблочная с более высоким применением средств автоматизации и механизации при изготовлении и проектировании, многожильные кабели, контактирование пайкой, сваркой, накруткой. Достигнутый уровень быстродействия составляет 10^6 опер/с.

Аппаратура четвертого поколения в составе элементного базиса содержит БИС, СБИС, а также большие гибридные интегральные схемы (БГИС). По функциональной сложности БИС и БГИС могут соответствовать блоку в аппаратуре первого или второго поколения. Кроме того, аппаратура четвертого поколения в составе элементного базиса содержит микросборки. При этом микросхемы предназначены для широкого применения и выпускаются крупными сериями специализированными заводами-изготовителями ИС, а МСБ (в основном гибридные) разрабатываются для конкретного ЭС, т. е. являются микросхемами частного применения. Микросборки, как и микросхемы, могут быть корпусированными и бескорпусными. Аппаратура четвертого поколения выполняется с большой долей отказа от дискретных элементов (в корпусах ИС) на основе многослойных печатных и керамических плат, гибких печатных шлейфов. Автоматизированное проектирование занимает главенствующее положение вплоть до выпуска конструкторской документации. Контактное ИС сваркой, узлов - пайкой. Достигнутый уровень быстродействия составляет 10^8 опер/с.

Аппаратура пятого поколения будет строиться на основе крупных функциональных блоков с применением БИС, СБИС и узлов функциональной микроэлектроники: оптоэлектронные, акустоэлектронные и пр. Ожидаемый уровень быстродействия должен составить 10^{12} опер/с.

Анализ современного состояния ЭС различного назначения, а также перспектив ее развития показывает, что с конструктивной точки зрения особенно

важными являются следующие направления: традиционное - конструирование и компоновка ЭС с использованием корпусированных ИС и МСБ на печатных платах; развивающееся - компоновка ЭС с использованием бескорпусных МСБ на металлических основаниях; перспективное - конструирование ЭС с использованием БИС и СБИС, в том числе матричных, в кристаллодержателях или на лентах-носителях на крупноформатных («гигантских») металлических подложках.

1.5. Типовые конструкции радиоэлектронных 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 РЭС 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 yz . В комплектном блоке соединение осуществляют рамой xz . Для стойки характерна одна рама yz , а пульт чаще всего состоит из рам xu и xz . 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. 1.6).

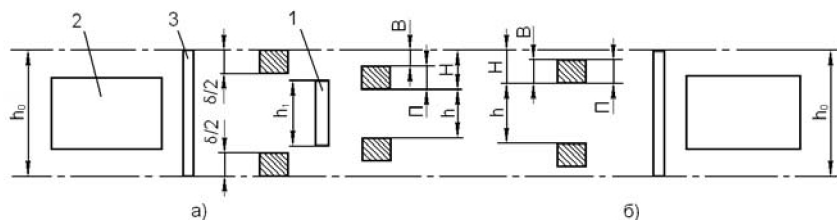


Рис.1.6. Схема полей допусков при системе вала (а) и широкоходовой посадке (б):
 h_0 - расчетный размер; h_1 - минимальный размер;
 h - номинал с полем допуска $\Pi = H - V$

При разработке размерной системы необходимо не только соблюсти 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 законченный 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 РЭС, развитие модульной техники, ограничение рядов типоразмеров компонентов конструкций, ориентация на современные методы конструирования, достижения микроэлектроники и прогрессивные технологические процессы позволили создать единую конструктивную базу РЭС - комплекс универсальных типовых конструкций (УТК), совместимый с автоматизированными методами проектирования и изготовления РЭС.

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

- УТК-I - стационарная РЭС, предназначенная для работы в отапливаемых и неотапливаемых помещениях (категории 3 и 4 по ГОСТ 15150-69);
- УТК-II - стационарная, полустационарная и подвижная РЭС, 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 - РЭС, устанавливаемая на подвижных объектах в труднодоступных местах и работающая на ходу в жестких условиях эксплуатации.

Таким образом, каждый класс УТК предназначен для РЭС, работающей в одинаковых или сходных условиях эксплуатации.

Состав комплекса УТК. Комплекс УТК построен по иерархическому принципу и включает компоненты пяти конструктивных уровней (КУ) (рис. 1.7):

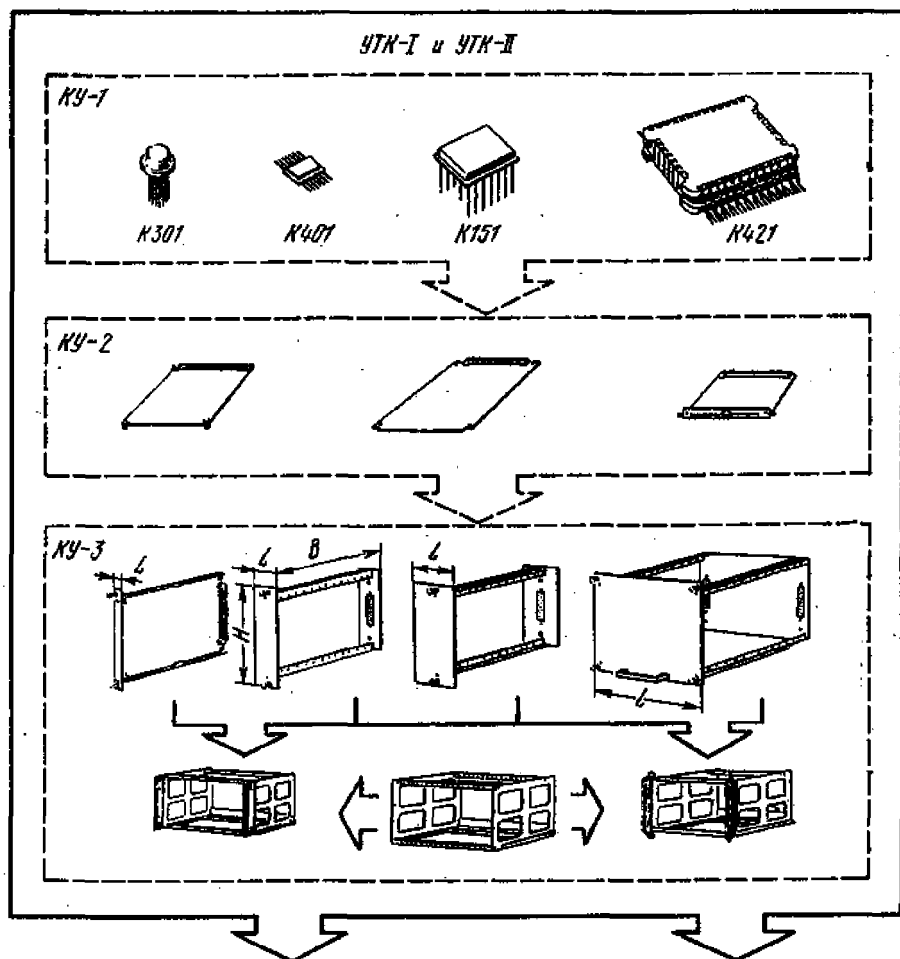


Рис. 1.7. Структура УТК

- КУ-0 - бескорпусные активные и пассивные микроэлементы в виде полупроводниковых транзисторов, диодов, диодных матриц, интегральных схем различной степени интеграции, пленочных резисторов и конденсаторов (табл. 1.2);

- 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;

- КУ-2 - унифицированные печатные платы. Для РЭС, разрабатываемой на базе УТК-I и УТК-II, ТЭК для РЭС, разрабатываемой на базе УТК-III;

Т а б л и ц а 1.2. Бескорпусная элементная база

Тип элемента	Размеры кристалла $I \times b \times h$	Монтажная площадь, мм ²	Выводы
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-III
Серия 734	1,8×1,8×0,8	13,8	14-П
Серия 756	1,6×1,6×0,8	2,56	14-III
Серия 775	1,5×1,5×0,8	2,25	8-III
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, III — папиковые.

- КУ-3 - частичные вставные блоки, комплектные блоки, блочные каркасы для РЭС, разрабатываемой на базе УТК-I и УТК-II, и несущие конструкции малогабаритных блоков для РЭС, разрабатываемой на базе УТК-III;

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

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 РЭС, второй и третий уровни УТК- компоненты второго общепринятого уровня, а компоненты четвертого уровня УТК являются одновременно компонентами третьего уровня конструкции РЭС.

2. УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

2.1. Дестабилизирующие факторы и их влияние на работоспособность РЭС

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 РЭС.

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 РЭС в целом. Небрежно составленная инструкция по эксплуатации также может быть причиной повреждения радиодеталей и радиокомпонентов.

Установлено, что из общего количества повреждений РЭС примерно 43% происходит от ошибок при конструировании, 20% зависят от изготовления радиодеталей и радиокомпонентов и РЭС, 30% относятся к условиям эксплуатации, а остальные 7% определяются износом, старением и недоброкачест-

венным 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 РЭС и ее элементов

Температурные воздействия являются одним из наиболее активных дестабилизирующих факторов. Повышение или понижение температуры почти всегда вызывает ухудшение работы РЭС, 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 [5].

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 радиодетали 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 может 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, осаждаясь 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 необратимым 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 РЭС

Радиодеталям и радиокомпонентам авиационных и космических РЭС 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 воз-

духа. 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:

$$U_{np} = f(p, d). \quad (2.2)$$

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

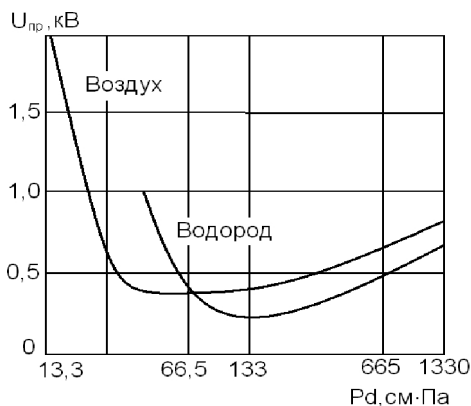


Рис. 2.1. Зависимость напряжения пробоя U_{np} от произведения pd

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 негерметизированы, 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 работу РЭС

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 сопротивления 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 РЭС

При эксплуатации РЭС 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 РЭС. 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 изменение 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 [6].

Механические воздействия, особенно ударные, могут вызвать различные поломки, которые приводят к отказу РЭС. 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, растрескивание 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 усилия, являющегося функцией уровня звукового давления и площади каждой детали элемента.

Для уменьшения влияния акустического шума опорные элементы конструкций и кожухи элементов и РЭС 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 РЭС подвергаются воздействию внутренних и внешних механических сил. Внутренние силы возникают вследствие работы механизмов внутри самих РЭС, чаще всего за счет эксцентриситета вращающихся узлов, например якоря электродвигателя, вызывая «силовое» механическое возбуждение конструкции РЭС. Воздействие внешних сил передается от объекта-

носителя на РЭС 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 РЭС. Последствия воздействий характеризуются динамическим параметром - силой F , действующей на элемент РЭС массой m , и моментом этой силы M_F или механическим напряжением σ , возникающим при деформации конструкции.

Так, воздействие гармонической вибрации задается законом колебаний

$$z = A_B \sin(2\pi ft) \quad (2.3)$$

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

$$R_z(\tau) = \sigma_z^2 r_z(\tau) \quad (2.4)$$

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_H . 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

$$I = 10 \lg(E/E_0), \quad (2.5)$$

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* РЭС, способные сохранять свои параметры в пределах установленных норм до подачи и после снятия механических воздействий;

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

Примером вибро- и ударопрочных РЭС является аппаратура, устанавливаемая на космических летательных аппаратах, функционирование 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 РЭС является аппаратура, устанавливаемая на подвижных объектах длительного действия, - автомобилях, самолетах, вертолетах. Для этих РЭС требования вибро- и удароустойчивости распространяются на весь период их эксплуатации.

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

Обратимые изменения связаны с временным нарушением устойчивости функционирования и проявляются в виде «виброшумов», возникающих в ЭРК, конструкциях РЭС 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 РЭС 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 $\sigma_{\text{выр}}$ (кривые Веллера) и их прочность снижается по мере увеличения числа циклов N знакопеременных деформаций.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В РЭС

3.1. Понятие моделирования и типы моделей

Моделирование - исследование каких-либо явлений, процессов или систем объектов путем построения и изучения их моделей. Моделирование - одна из основных категорий теории познания. На идее моделирования 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 [1].

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 показатели 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, повторяющими 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 но-

сят 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:

$$j = -\sigma \operatorname{grad} U; \quad P = -\lambda \operatorname{grad} t, \quad (3.1)$$

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

2. Потоки j и P электрического и теплового полей:

$$j = -\sigma \int_S \operatorname{grad} U \cdot d\vec{s}; \quad P = -\lambda \int_S \operatorname{grad} t \cdot d\vec{s}. \quad (3.2)$$

3. Объемная плотность тока IV и производительность внутренних источников тепла:

$$\operatorname{div} \vec{j} = j_V; \quad \operatorname{div} \vec{p} = q_V. \quad (3.3)$$

4. Поле потенциалов и температурное поле (уравнение Пуассона):

$$\Delta^2 H = -\frac{j_V}{\sigma}; \quad \Delta^2 t = -\frac{q_V}{\lambda}, \quad (3.4)$$

т. е. аналогами являются:

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

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. Кибернетическое моделирование

В процессе исследования объекта часто бывает нецелесообразно или даже невозможно иметь дело непосредственно с этим объектом. Удобнее бывает заменить его другим объектом, подобным данному в тех аспектах, которые важны в данном исследовании. Например, модель самолета продувают в аэродинамической трубе, вместо того, чтобы испытывать настоящий самолет - это дешевле и безопаснее. При теоретическом исследовании атомного ядра физики представляют его в виде капли жидкости, имеющей поверхностное натяжение, вязкость и т.п. Управляемые объекты являются, как правило, очень сложными, поэтому процесс управления неотделим от процесса изуче-

ния этих объектов. При таком подходе целесообразно дать новое, уточненное понятие модели.

Модель - это мысленно представляемая или материально реализованная система, которая, отображая или воспроизводя объект исследования, способна замещать его так, что ее изучение дает новую информацию об этом объекте.

При моделировании используется аналогия между объектом - оригиналом и его моделью. Аналогии бывают следующими:

- 1) внешняя аналогия (модель самолета, корабля, микрорайона);
- 2) структурная аналогия (водопроводная сеть и электросеть моделируются с помощью графов, отражающих все связи и пересечения, но не длины отдельных трубопроводов);
- 3) динамическая аналогия (по поведению системы) - маятник моделирует электрический колебательный контур;
- 4) кибернетические модели относятся ко второму и третьему типу. Для них свойственно то, что они реализуются с помощью ЭВМ. Смысл кибернетического моделирования заключается в том, что эксперименты проводятся не с реальной физической моделью объекта, а с его описанием, которое помещается в память ЭВМ вместе с программами, реализующими изменения показателей объекта, предусмотренные этим описанием.

С описанием производят машинные эксперименты: меняют те или иные показатели, т.е. изменяют состояние объекта и регистрируют его поведение в этих условиях. Часто поведение объекта имитируется во много раз быстрее, чем на самом деле, благодаря быстродействию ЭВМ. Кибернетическую модель часто называют имитационной моделью.

Формирование описания объекта (его системный анализ) является важнейшим звеном кибернетического моделирования. Вначале исследуемый объект разбивается на отдельные части и элементы, определяются их показатели, связи между ними и взаимодействия (энергетические и информационные). В результате объект оказывается представленным в виде системы. При этом очень важно учесть все, что имеет значение для той практической задачи, в которой возникла потребность в кибернетическом моделировании, и вместе с тем не переусложнить систему.

Следующим этапом является составление математических моделей функционирования объекта и его системной модели. Затем производится программирование описания объекта и модели его функционирования.

3.4. Управление моделями устройств РЭС

Управление - это такое входное воздействие или сигнал, в результате которого система ведет себя заданным образом [3,4]. Обычно управление направлено на то, чтобы система находилась в стационарном режиме (равновесном или периодическом).

Управление развитием системы - это воздействия или сигналы, направленные на изменение структуры или множества состояний системы. Например, план реконструкции предприятия. В этом случае осуществляется управление поведением системы, которая реализует развитие данной системы.

Таким образом, управление всегда имеет определенную цель. Обычно она формулируется как ограничение на множество возможных состояний системы или какой-либо показатель системы, который нужно поддерживать в заданных пределах либо максимизировать. Если известна зависимость указанного показателя от входных воздействий на систему или ее состояния, то он называется целевой функцией.

Часто цель не может быть достигнута сразу, а необходимо пройти несколько этапов, на каждом из которых имеется локальная цель, не совпадающая с главной целью. Эти локальные цели называются задачами управления. Пример: автобус идет по маршруту. Цель - конечный пункт. Задача - проехать по данной улице. Может оказаться, что направление движения по улице сильно отличается от направления на конечный пункт.

Для осуществления процесса управления нужно наличие трех элементов:

- управляемый объект;
- орган управления;
- исполнительный орган.

Орган управления - это система, на вход которой поступают сигналы о состоянии управляемого объекта и среды, а на выходе - сигнал о необходимом в данной ситуации управлении.

Исполнительный орган - это система, на вход которой поступает сигнал о необходимом управлении, а на выходе вырабатывается управляющее воздействие на управляемый объект.

Система управления объединяет орган управления и исполнительный орган.

Системы управления бывают следующими:

- 1) ручные - без использования вычислительной техники;
- 2) автоматизированные - используется вычислительная техника, которая принимает на себя основной поток информации, однако человек остается важнейшим звеном системы управления, функцией которого является принятие решений либо утверждение решений, выработанных ЭВМ;
- 3) автоматические - человек не участвует в процессе управления и не входит в данную систему управления. Обычно он осуществляет контроль за правильностью функционирования объекта управления и вмешивается только при возникновении особых (например, аварийных) ситуаций. В автоматических системах управления человек является звеном другой системы управления, для которой управляемым объектом является данная автоматическая СУ с управляемым ею объектом.

3.5. Моделирование в процессе проектирования РЭС

Современные достижения науки и техники, возрастающая функциональность современных изделий требуют выполнения проектных работ большого объема. Требования к качеству проектов, срокам их выполнения оказываются все более жесткими в условиях конкурентной борьбы за потребителя. Удовлетворить эти требования путем количественного увеличения проектировщиков невозможно, так как распараллеливание проектных работ неограничено.

Решение проблемы возможно путем внедрения в практику инженерного проектирования методов и средств автоматизированного проектирования.

Цели автоматизации проектирования - повышение качества, снижение материальных затрат, сокращение сроков проектирования и повышение производительности труда проектировщиков.

Под автоматизацией проектирования понимается такой способ проектирования, при котором весь цикл проектных работ осуществляется рационально распределенным взаимодействием человека и компьютера.

В первые годы применения компьютеров в процессе проектирования бытовало мнение о снижении требований к квалификации проектировщиков при использовании автоматизированного проектирования, однако эта точка зрения не получила подтверждения практикой, так как инженер-проектировщик помимо владения предметной областью должен знать модели, методы и методики автоматизированного проектирования. А это предъявляет повышенные требования к уровню профессиональной подготовки инженера.

В настоящее время термин «автоматизация проектирования» характеризует целое научно-техническое направление, базирующееся на современных достижениях физики, математики, вычислительной техники и теории проектирования.

Предметом автоматизации проектирования являются формализация проектных процедур, структурирование и типизация процессов проектирования, постановки, модели, методы и алгоритмы, информационная поддержка решения проектных задач, а также технические средства и способы их объединения в единую проектирующую систему.

3.5.1. Электрические модели РЭС

Электрическими называются модели РЭС, отображающие процессы, протекающие в принципиальных схемах аппаратуры с учетом паразитных параметров конструкций. При создании моделей радиоэлементов используются два принципиально различных подхода. Первый подход основан на использовании уравнений, описывающих физические принципы работы радиоэлемента. Такие модели мы будем называть физическими. Второй - не требует изучения физических закономерностей процессов в радиоэлементе, а целиком основан на исследовании связей между токами и напряжениями на внешних

выводах радиоэлемента. Такие модели мы будем называть макромоделями (рис 3.2).

Моделирование электрической схемы начинают с построения физической модели протекающих в ней электрических процессов. Для построения физической модели используют хорошо разработанный в теории электрических цепей метод построения эквивалентных схем, содержащих резисторы, конденсаторы, индуктивности, источники тока и напряжения.

В соответствии с ним электрические модели РЭС могут быть получены путем замены каждого радиоэлемента принципиальной схемы его моделью (эквивалентной схемой) и добавлением в полученную таким образом модель РЭС паразитных проводимостей, емкостей, индуктивностей, источников наводимых потенциалов и токов и других параметров, обусловленных конкретным выполнением принципиальной схемы в конструкции РЭС.

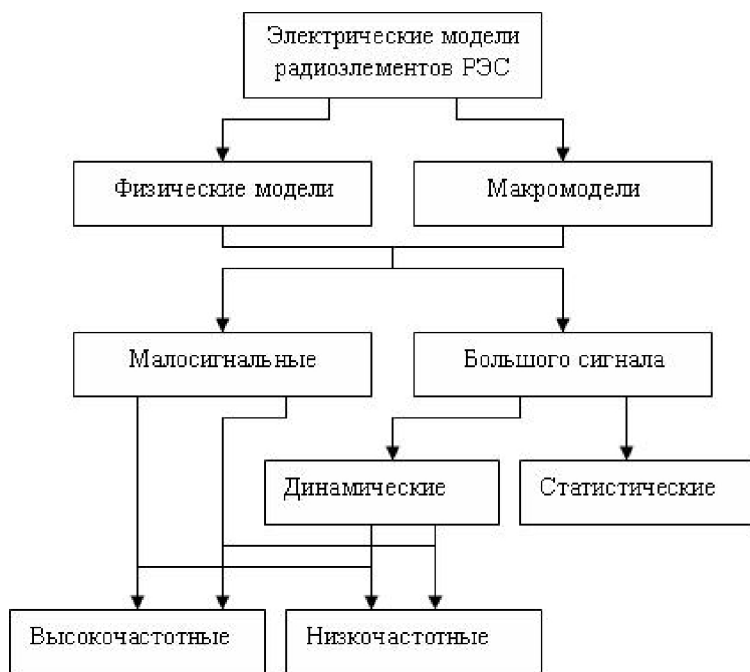


Рис.3.2. Электрические модели РЭС

Для одного и того же радиоэлемента применяют, как правило, ряд моделей, различающихся степенью учета тех или иных особенностей электрических процессов, которые в нем протекают. Это обусловлено противоречивостью требований, предъявляемых к моделям, например, универсальностью, с одной стороны, и экономичностью, с другой.

Универсальность модели определяется ее применимостью к расчету более или менее широкого класса схем, однако попытка учесть в модели все, что известно о моделируемом объекте, как правило, обречена на провал, поскольку приводит к уравнениям сложного вида и большому количеству параметров и переменных.

Экономичность модели характеризует затраты ЭВМ на проведение расчета с использованием данной модели.

3.5.2. Определение основных параметров РЭС в процессе моделирования

С задачей определения основных параметров системы приходится сталкиваться любому разработчику. Грамотно проведенное моделирование и последующая оптимизация параметров на этапе функционального проектирования позволят экономить значительные силы и средства на этапах схемотехнического проектирования и конструирования устройства. В этой главе дается краткий обзор и примеры использования современных программных средств для решения задач системотехнического проектирования и моделирования устройств.

Как известно, под радиоэлектронным средством (РЭС) понимается изделие, в основу функционирования которого положены принципы радиотехники и электроники.

Проведем классификацию РЭС по степени их функциональной сложности:

- радиоэлектронные системы - совокупность функционально взаимодействующих автономных радиоэлектронных комплексов и устройств, образующих целостное единство, обладающее свойством перестроения структуры;
- комплексы - совокупность функционально связанных радиоэлектронных устройств, обладающая свойством перестроения структуры в целях сохранения работоспособности;
- устройства - функционально законченная сборочная единица, выполненная на несущей конструкции, и реализующая функции передачи, приема, преобразования информации;
- функциональный узел - функционально законченная сборочная единица, выполненная на несущей конструкции, реализующая функцию преобразования сигнала и не имеющая самостоятельного эксплуатационного применения.

Данная классификация позволяет понять, какого уровня средства необходимы для адекватного описания каждого из элементов системы в отдельности и всего комплекса в целом. Известно, что радиоэлектронное средство представляет собой сложный объект, включающий большое число составных частей с многообразными связями между ними. Для правильного понимания принципов функционирования РЭС и его грамотной разработки и эксплуата-

ции описание таких объектов в процессе их создания и использования должно быть согласовано с возможностями их восприятия и использования инженером-разработчиком, конструктором, эксплуатационником. С этой точки зрения можно выделить следующие типы описания РЭС:

- функциональный - отображает основные принципы работы и протекающие в РЭС физические и информационные процессы;
- конструкторский - отображает физическую реализацию РЭС, его геометрические формы, расположение в пространстве, используемые материалы и компоненты ;
- технологический - относится к методам и средствам изготовления РЭС.

Для упрощения восприятия описаний, их систематизации они разделяются на иерархические уровни. Каждый уровень описания отличается степенью детализации. На всех уровнях описания следует стремиться представить РЭС в виде совокупности связанных блоков, которые являются замкнутыми составными частями. Каждый блок такого иерархического уровня описания представляет собой описание следующего, более низкого иерархического уровня, который, в свою очередь, представляется в виде совокупности блоков. По функциональному описанию РЭС уровни включают систему, комплекс, устройство и функциональный узел.

При проектировании широко используются промежуточные описания РЭС и его составных частей. Важнейшее место среди них занимают модели различных классов. Например, представления о свойствах РЭС могут быть получены с помощью натурной модели (макета, стенда и т.д.), представляющие собой некий «образ» РЭС. Свойства РЭС на таких моделях изучаются путем эксперимента. Однако такой путь исследования не всегда применим ввиду высоких материальных и временных затрат. Поскольку современный процесс проектирования немыслим без широкого использования ЭВМ и соответствующего программного обеспечения, доминирующую роль среди промежуточных описаний играют математические модели. Дадим ее определение. Математическая модель РЭС - совокупность математических объектов (чисел, переменных и т.п.), отражающая свойства радиоэлектронного средства и отношения между ними.

Рассмотрим процесс проектирования РЭС с позиций системотехники. Этапы проектирования состоят из отдельных проектных процедур, каждая из которых заканчивается частным проектным решением. Типичными для проектирования РЭС процедурами являются анализ и синтез описаний различных уровней.

При грамотном проектировании процесс начинается с синтеза алгоритма функционирования системы. При синтезе мы имеем несколько совокупностей исходных данных, условий и ограничений. Процедура синтеза заключается в создании проектного решения по заданным требованиям, свойствам и ограничениям - примером может служить синтез электронных схем по заданным

характеристикам в частотной или отклику во временной области, синтез оптимальных по какому-либо критерию фильтров (Винера, Калмана), синтез алгоритмов обнаружения и распознавания. В процессе синтеза создается структура схемы. Процедура анализа состоит в определении свойств заданного описания, например расчет частотных или переходных характеристик схем, определение реакции схемы на заданное воздействие и др. Анализ позволяет оценить степень удовлетворения проектного решения заданным требованиям.

Типичной проектной процедурой является оптимизация, которая приводит к оптимальному (по заранее определенному критерию) проектному решению. Например, широко используется оптимизация параметров электронных схем с целью наилучшего приближения частотных характеристик к заданным. Процедура оптимизации состоит в многократном анализе при целевом изменении параметров схемы до удовлетворительного приближения к заданным характеристикам.

В процессе проектирования необходимо не просто создать аппаратуру, которая будет обеспечивать заданное функционирование, но и оптимизировать ее по широкому спектру функциональных, конструкторско-технологических, эксплуатационных и экономических показателей. На отдельных этапах для отдельных частных задач оптимизацию еще можно осуществить на основе разработанных формальных математических методов. Однако применительно к комплексным РЭС задача оптимизации не всегда поддается формализации. В этом случае рассматриваются несколько вариантов решения поставленной задачи, подсказанных, как правило, предшествующим опытом, интуицией, и выбирают лучший из них. Такой подход называется эвристическим многовариантным анализом или дискретным выбором варианта построения системы. Однако в связи с все возрастающей сложностью РЭС, с повышением требований к ним необходимые расчеты оказываются все более трудоемкими, а количество вариантов, целесообразных для рассмотрения, катастрофически возрастает, кроме того, эта процедура практически неформализуема.

Часто на этапе проектирования трудно предвидеть некоторые требования, определяемые особенностями эксплуатации изделия. В результате всего этого создание нового РЭС затягивалось на долгие годы. Представляемые к испытаниям опытные образцы часто оказывались не удовлетворяющими заданным требованиям, а доводка аппаратуры происходила в процессе испытаний, что удорожало проектирование во много раз.

Подобное положение не было виной разработчиков. Это результат возникшего принципиального несоответствия традиционного подхода к проектированию и сложности современных радиоэлектронных средств.

Указанное противоречие и вызвало интенсивное развитие новой технологии проектирования РЭС, базирующейся на системном подходе и совершен-

ствовании процессов проектирования с применением математических методов и средств вычислительной техники. А замена макетирования и натурного моделирования математическим моделированием, использованием эффективных методов многовариантного проектирования и оптимизации повышала качество управления проектированием. В настоящее время эти тенденции к автоматизации всего процесса проектирования РЭС привели к появлению нескольких систем автоматического проектирования (САПР), решающих задачи функционального моделирования, моделирования работы отдельных схем и т.д. Эти САПР позволяют моделировать работу аппаратуры и обладают средствами анализа процессов, происходящих в модели. К числу таких САПР относится система SystemView фирмы Elanix, MatLab - Simulink, LabView и другие.

Трансформация макетирования и натурного моделирования в математическое моделирование, с возможностью представления объекта его экспериментальными характеристиками, привела к появлению на рабочих местах проектировщиков специализированных САПР «виртуальных инструментов». Эти САПР обладают средствами для создания виртуальных устройств различного назначения - осциллографов, анализаторов спектра и обработки данных, полученных как в режиме реального времени от физического объекта, так и данных в виде файлов данных. Тема LabView является именно таким САПР.

Виртуальный инструмент можно использовать при анализе и верификации модели созданной САПР функционального проектирования. Поэтому комбинирование САПР функционального моделирования и САПР виртуальных инструментов позволяет не только создать модель, но и детально исследовать ее поведение.

3.5.3. Моделирование проектных задач

Рассмотрим классификацию проектных задач, решаемых в процессе проектирования РЭС (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Классификация проектных задач

Задачи синтеза технических объектов направлены на создание новых вариантов проектных решений. Создаваемые в процессе синтеза проектные решения должны быть оформлены на языке оформления проектной документации, например в виде чертежей, схем и пояснительного текста. В этом языке действуют правила, установленные единой системой конструкторской документации (ЕСКД).

Различают задачи структурного и параметрического синтеза. В первом случае синтезируется структура проектируемого объекта, а во втором его параметры.

Задачи анализа технических объектов направлены на изучение их свойств. В процессе анализа не создаются новые объекты, а лишь исследуются заданные.

Решение задачи анализа позволяет получить информацию о выходных характеристиках объекта, режимах работы его элементов, тепловых и механических режимах конструкции и т.д.

Необходимо отметить, что часто задачи синтеза решаются путем многократного решения задач анализа.

Решения задачи оптимизации направлены на поиск не любого, а наилучшего, в некотором смысле, проектного решения. Если в процессе оптимизации ищется наилучшая структура, то такую задачу называют структурной оптимизацией, а если при заданной структуре отыскиваются параметры объекта, удовлетворяющие заданному критерию, то такую задачу называют параметрической оптимизацией.

Параметры элементов любого технического объекта не могут иметь точно заданные значения. Это является следствием неизбежных погрешностей технологического оборудования, влияния внешних факторов, разбросов параметров материалов и т.д. Поэтому параметры элементов являются случайными величинами. А это значит, что при серийном производстве каждый экземпляр проектируемой аппаратуры будет иметь случайные значения выходных характеристик. Другими словами, выходные характеристики партии объектов будут лежать в некотором диапазоне. Хорошо, если этот диапазон не выходит за рамки регламентируемого в техническом задании. В противном случае, те объекты, значения выходных характеристик которых выходят за пределы диапазона, регламентируемого техническим заданием, считаются неработоспособными. Учесть влияние разбросов параметров элементов на выходные характеристики и уменьшить это влияние позволяет решение задачи исследования разбросов.

3.6. Алгоритм автоматизированного проектирования РЭС

Исходным документом для начала проектирования является техническое задание (ТЗ). В нем перечислены все технические требования, предъявляемые к создаваемой аппаратуре [8]. В состав основных требований входят:

- значения выходных характеристик и их допустимые разбросы;
- показатели надежности: вероятность безотказной работы, время эксплуатации, срок службы и др.;
- условия эксплуатации: влажность, давление, температура и др.;
- специальные воздействия: вибрация, удары, акустический шум, радиация и др.;
- условия хранения и транспортировки.

На основе технического задания создается проект (рис.3.4).



Рис.3.4. Схема процесса автоматизированного проектирования РЭС

Это эвристический набросок схемы и конструкции. На этом этапе разрабатываются эскизы структурной и функциональной схем устройства, производится предварительная компоновка и размещение.

Далее разработанный проект исследуется и многократно уточняется (рис.3.4, стрелки 2 - 7), при этом происходит постепенный переход от эскизного проекта к техническому.

На основе эскизов схем и конструкций производится формализация проекта, результатом которой являются физические модели схемы и конструкции, составленные в терминах соответствующего научного направления, например, электрические - в терминах электротехники, механические - в терминах механики, тепловые - в терминах теории теплообмена. Формализация проекта производится с позиции системного подхода и заключается в учете тех или иных факторов, влияющих на функционирование аппаратуры при построении физических моделей.

На основе физических моделей получают математические модели, полученные с использованием математических методов и законов соответствующих наук. Они являются основой для расчета выходных характеристик, проектируемой аппаратуры, а также параметров и факторов, по которым оценивается фактическое состояние схемы или конструкции.

В результате расчета с использованием математических моделей получается информационная модель устройства, которая включает в себя расчетные значения выходных характеристик, требования технического задания, информацию из технических условий на элементы схемы и конструкции, расчетные значения электрических, тепловых и механических режимов работы элементов, показатели, определяющие надежность и качество изделия, а также множество внутренних параметров схемы и конструкции, которые могут быть управляемыми. Под множеством управляемых параметров понимается перечень внутренних параметров аппаратуры, которые можно изменять в процессе проектирования для улучшения выходных характеристик аппаратуры и режимов работы ее элементов.

Путем сопоставления требований ТЗ с расчетными характеристиками, режимов работы элементов с допустимыми режимами, приведенными в технических условиях выявляются те характеристики и режимы работы элементов, которые необходимо изменить, и на этой основе строится модель чувствительности.

В результате расчета модели чувствительности определяются функции чувствительности, показывающие степень влияния управляемых параметров на выходные характеристики и позволяющие окончательно сформулировать проектные задачи, которые необходимо решить для доработки проекта. Существуют три группы проектных задач:

1. Задачи синтеза, расчета и оптимизации структуры и параметров схемы и конструкции.
2. Задачи исследования разбросов параметров вокруг номинальных значений.
3. Задачи обеспечения показателей надежности и качества.

Решение сформулированных проектных задач позволяет внести соответствующие изменения в схему и конструкцию проектируемой аппаратуры и уточнить проект.

Таким образом, из приведенного описания схемы автоматизированного проектирования следует:

1. Процесс проектирования носит итерационный характер, т.к. решения в этом процессе принимаются в условиях отсутствия полной информации, поэтому возникают ситуации, когда были приняты нереализуемые, по тем или иным причинам, решения. Их исправление происходит путем повторного выполнения проектных процедур.

2. Процесс проектирования реализуется путем моделирования различных физических процессов, протекающих в аппаратуре при ее функционировании.

3.7. Моделирование в процессе автоматизированного проектирования РЭС

Как было показано ранее, процесс проектирования реализуется путем моделирования различных физических процессов, протекающих в аппаратуре при ее функционировании.

Под моделью аппаратуры понимается представленное в той или иной форме математическое описание, которое адекватно отражает сущность и характерные свойства рассматриваемого физического процесса, протекающего в схеме и конструкции аппаратуры.

Построение моделей аппаратуры предполагает формализацию схемы и конструкции с точки зрения рассматриваемого процесса, а она, в свою очередь, предполагает принятие определенных допущений. Поэтому модели не полно отражают детали рассматриваемого процесса. Степень соответствия модели реальным процессам определяет точность получаемых при моделировании результатов и зависит от полноты учета существенных сторон моделируемых процессов.

Практика инженерного проектирования РЭС показывает, что наиболее существенное влияние на выходные характеристики, их разбросы и надежность аппаратуры оказывают взаимосвязанные между собой электрические, тепловые и механические процессы.

Сформулируем принципы, исходя из которых строятся модели этих процессов.

Модель электрических процессов:

- отражает электрические процессы, протекающие в схеме аппаратуры, что должно обеспечить получение с заданной точностью функциональных и режимных электрических характеристик;
- включает в себя эквивалентные схемы радиоэлементов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, диодов, транзисторов, микросхем и пр.);
- учитывает паразитные проводимости, емкости, индуктивности, взаимные индуктивности и другие параметры, отражающие влияние конструкции на протекающие электрические процессы.

Модель тепловых процессов:

- отражает тепловые процессы в конструкции, связанные с теплообменом под влиянием окружающей среды, тепловыделениями в радиоэлементах,

действием систем охлаждения и термостатирования, что должно обеспечить получение с заданной точностью тепловых характеристик;

- учитывает кондуктивные, конвективные и лучистые составляющие теплообмена в аппаратуре;
- учитывает распределенность массы элементов конструкции и анизотропность тепловых свойств электрорадиоэлементов.

Модель механических процессов:

- отражает механические процессы в конструкции, связанные с появлением механических деформаций и напряжений при механических воздействиях, что должно обеспечить получение с заданной точностью статических, частотных и временных механических характеристик;
- учитывает распределенность массы несущих конструкций и анизотропность механических свойств ЭРЭ;
- учитывает эффект внутреннего трения в материалах конструкции при деформациях;
- учитывает жесткость крепления ЭРЭ к печатным платам, шасси и другим несущим конструкциям, а также крепления элементов конструкции друг с другом.

Модель надежности и качества:

- отражает, с заданной точностью, характеристики надежности и качества аппаратуры, связанные с технологическими факторами, тепловыми и механическими воздействиями, процессами старения;
- учитывает электрические, механические и тепловые режимы ЭРЭ;
- учитывает электрические, механические и тепловые режимы элементов конструкции;
- учитывает разбросы параметров ЭРЭ и элементов конструкции.

С учетом изложенного представим схему взаимодействия моделей в процессе автоматизированного проектирования. Блоками выделим исходную информацию для построения моделей физических процессов в виде электрической схемы, эскиза конструкции и сами модели. Стрелками покажем взаимодействие между моделями. Надписи на стрелках показывают информацию, которая получается в результате расчета по одной модели и требуется для построения другой (рис.3.5).

Например, модель электрических процессов строится на основе топологии схемы, перечня элементов, паразитных параметров, вносимых конструкцией, температур элементов РЭС. В результате моделирования электрических процессов помимо функциональных характеристик схемы получают мощности тепловыделений элементов, необходимые для построения модели тепловых процессов, режимы работы элементов РЭС и функции чувствительности, необходимые для построения модели надежности и качества.

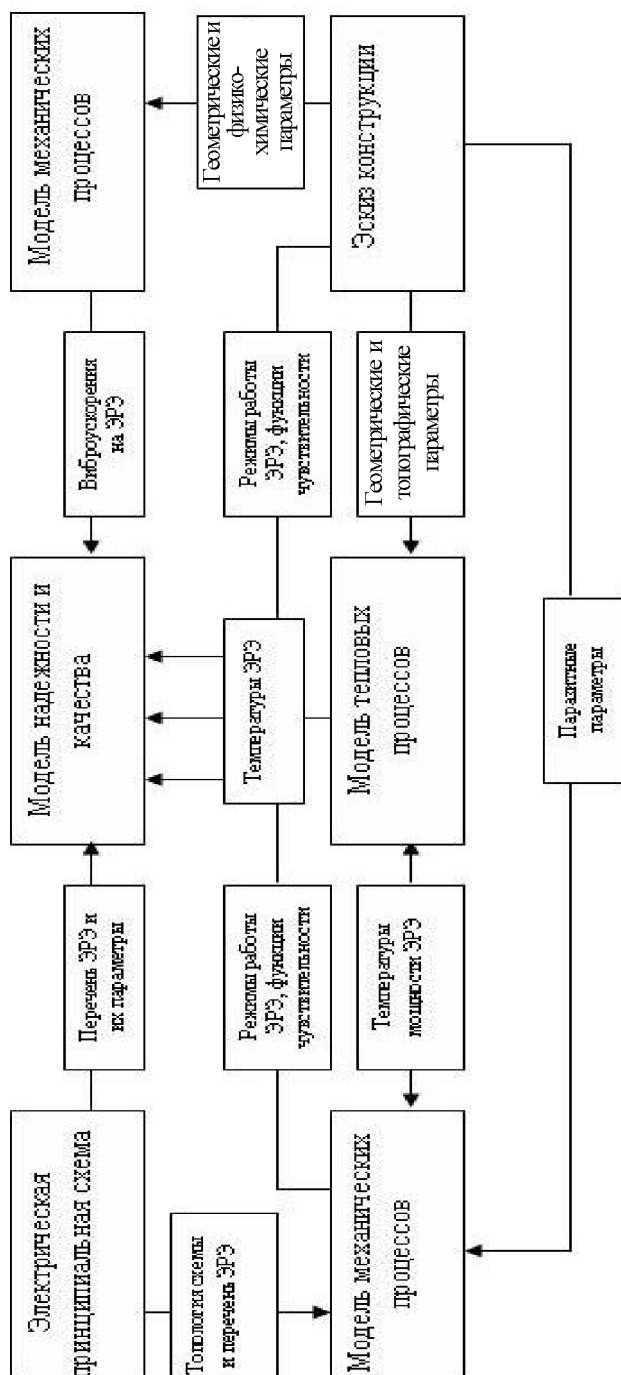


Рис. 3.5. Схема взаимодействия моделей

3.8. Основы моделирования конструкций и технологических процессов производства РЭС

Поскольку системный подход ориентирует конструктора и технолога на раскрытие целостности объекта проектирования (т. е. конструкции РЭС 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 РЭС такая фиксация проводится в виде набора различных моделей.

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

На рис. 3.6 показано, что исходные данные на проектирование РЭС содержатся в техническом задании, с помощью которого осуществляется переход непосредственно к проекту РЭС. Вначале, как уже упоминалось выше, проект предстает как мысленный образ будущей схемы и конструкции РЭС, 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.

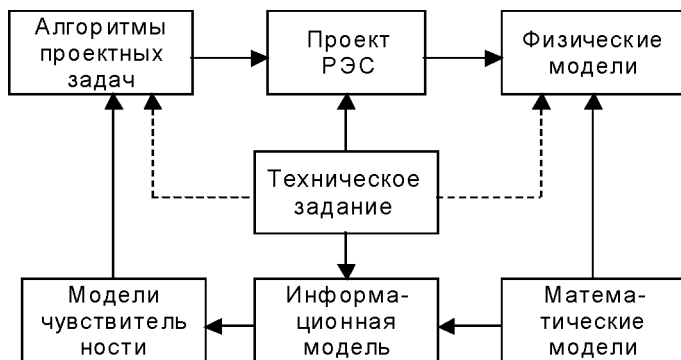


Рис. 3.6. Роль моделей в автоматизированном процессе
разработки ЭС

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. 3.6).

Первый пример: при переходе к физической модели электрического процесса, протекающего в схеме РЭС, 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 применить 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 тепломассообмена и т. д. В принципе физические модели РЭС 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 РЭС.

Переход от физических моделей к математическим (см. рис.3.5) 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 характеристики 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 относятся объекты, состоящие из многих элементов, например, бытовая электроника, радиолокационная стан-

ция и другая электронная аппаратура, которые можно считать и 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, пробой 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 возникновения 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.

На рис. 4.1 приведена графическая интерпретация перечисленных показателей:

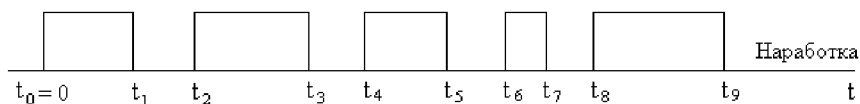


Рис. 4.1. Графическая интерпретация показателей

где $t_0 = 0$ - начало эксплуатации; t_1, t_5 - моменты отключения по технологическим причинам; t_2, t_4, t_6, t_8 - моменты включения объекта; t_3, t_7 - моменты вывода объекта в ремонт, соответственно, средний и капитальный; t_9 - момент прекращения эксплуатации; t_{10} - момент отказа объекта.

Технический ресурс

$$T_p = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_{10} - t_8).$$

Назначенный ресурс

$$T_n = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_9 - t_8).$$

Срок службы объекта $T_c = t_{10}$.

Для большинства РЭС в качестве критерия долговечности используется технический ресурс.

Показатели надежности представляются в двух формах (определениях):

- *статистическая* (выборочные оценки);
- *вероятностная*.

Статистические определения (выборочные оценки) показателей получаются 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 РЭС подвергаются воздействию комплекса внешних и внутренних факторов, основные из которых температура, влажность, вибрация, удары, атмосферное давление и уровень электрической нагрузки. Одновременное воздействие на РЭС комплекса внешних и внутренних факторов приводит к изменениям электрических и механических свойств материалов, из которых изготовлены элементы РЭС, и следовательно, к изменению параметров этих элементов.

Поэтому рассмотрение надёжности РЭС 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 $\lambda(t)$. Основной путь 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 «нестареющим», поскольку они работают только на участке с $\lambda(t) = \text{const}$.

Расчет надёжности РЭС 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 РЭС (условно все электрорадиоэлементы РЭС соединены последовательно, в смысле надёжности);

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

- все электрорадиоэлементы функционируют постоянно и одновременно;

- отказы электрорадиоэлементов взаимонезависимые.

Условия эксплуатации РЭС 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 (см. Приложение 4), 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, то все соответствующие коэффициенты должны быть больше или равны 1. Значения указанных коэффициентов для различных условий эксплуатации можно найти в [3] или справочной литературе.

Окончательное значение интенсивности отказов РЭС находится по формуле

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

где $\alpha_i = \alpha_{им} \cdot \alpha_{ит} \cdot \alpha_{ив} \cdot \alpha_{ид}$ - соответствующие поправочные коэффициенты, учитывающие влияние механических воздействий ($\alpha_{им}$), влаги ($\alpha_{ив}$), температуры ($\alpha_{ит}$) и давления ($\alpha_{ид}$).

Вероятность безотказной работы РЭС определяется по формуле

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

где t - заданное время непрерывной работы РЭС.

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

Ориентировочный расчет надёжности 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 РЭС. 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 РЭС 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 используемой 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 РЭС 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 $T_{ср}$ 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 РЭС

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

Получив от главного конструктора системы долю надежности i -й 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 выбираются элементы с требуемой надежностью.

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

Таблица 4.1. Относительная стоимость ущерба

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

Надежность современных РЭС в основном зависит от достижимого уровня надежности составляющих их технических средств и определяется надежностью составляющих ее компонентов. Кроме того, современная РЭС 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 РЭС 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 РЭС, 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 РЭС. К нагрузкам относятся электрические, механические, тепловые, магнитные и пр. Они уменьшают прочность компонентов РЭС и усиливают их износ. Уменьшение вредного влияния второй группы зависит от разработчика. Например, снижение тепловых нагрузок всего на 20% увеличивает надежность РЭС 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 элементов с необходимой надежностью; их энергетическая разгрузка в рациональных пределах и защита 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 РЭС 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 РЭС соответствовал уровням мировых стандартов, необходимо, чтобы соотношение цена/качество было не хуже, чем у других фирм. Из этих соображений выбор элементной базы только по показателям надежности, как это делают некоторые разработчики аппаратуры, может привести к такому удорожанию РЭС, что исчезает необходимость в выпуске подобных РЭС.

Наиболее правильно использовать показатели надежности, которые даны в технических условиях на данный элемент, однако предприятия, выпускаю-

щие 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 РЭС на отказ (до 100 и более лет). Примерные значения интенсивностей отказов распространенных и относительно дешевых электрорадиоэлементов представлены в табл. 4.2.

Т а б л и ц а 4.2. Интенсивности отказов

№ п /п	Наименование элемента	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$
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, птекеры, вилки	0,5...2,0
7	Пайка	0,1...0,01

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.

Поэтому разработчик РЭС 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 РЭС необходимо иметь принципиальную схему РЭС, спецификацию к ней. Затем установить условия эксплуатации с тем, чтобы ввести поправки в расчеты интенсивности отказов (см. Приложение 4).

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 РЭС (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 РЭС 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.

При этих допущениях параметры надежности вычисляются по следующим формулам:

- интенсивность отказов устройства

$$\lambda = \sum \lambda_i \quad n_i \quad \alpha_M, \alpha_B, \alpha_T, \alpha_d,$$

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, температура, давление);

- вероятность безотказной работы

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

- время наработки на отказ

$$T_H = 1/\lambda.$$

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

Т а б л и ц а 4.3. Интенсивности отказов и поправочные коэффициенты

Тип элемента	n_i	$\lambda_i, 10^{-6} 1/ч$	α_{IT}	α_{IB}	$n_i \lambda_i \alpha_{IT} \alpha_{IB}, 10^{-6} 1/ч$
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
Резисторы (перем.)	1	25	1,2	1,2	36
Диоды	5	1	1,4	1,0	7
Транзисторы	14	1	1,4	1,0	19,6
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

Интенсивность отказов системы

$$\Lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_{0i} \cdot \alpha_i \cdot n_i = 1350 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

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:

$$P(t) = e^{-\Lambda \cdot t} = \exp(-1350 \cdot 10^{-6} \cdot 365) = 0,491,$$

Среднее время наработки на отказ составит

$$T_H = \frac{1}{\Lambda} = 741 \text{ ч.}$$

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.

Т а б л и ц а 4.4. Интенсивности отказов и поправочные коэффициенты

Тип элемента	n_i	$\lambda_i, 10^{-6}, 1/\text{ч}$	$\alpha_{\text{гт}}$	$\alpha_{\text{ив}}$	$n_i \cdot \lambda_i \cdot \alpha_{\text{гт}} \cdot \alpha_{\text{ив}}$ $10^{-6}, 1/\text{ч}$
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
$R_{\text{пер}}$	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

Для того чтобы данное изделие соответствовало техническим условиям, 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 заменить более надёжными конденсаторами типа ЭТО-1, интенсивность отказов которых 10^{-5} /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

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

5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

5.1. Выбор и обоснование метода и принципа конструирования

Основная задача при компоновке ЭС - это выбор форм, основных геометрических размеров, ориентировочное определение массы и расположение в пространстве (любых) элементов ЭС. Методы компоновки разбиваются на две группы: аналитические и модельные. Основой первого метода является представление геометрических параметров или их обобщение и операции с ними в виде чисел. Основой второго метода является та или иная физическая модель элемента, например, в виде геометрически подобного тела. Из-за большого числа разнотипных элементов, входящих в ЭС, аналитическая компоновка не получила широкого применения и чаще заменяется номографической компоновкой.

В блоках ЭС между узлами существуют электрические, механические и другие связи. Зависимость этих связей требует различных методов конструирования (машиностроительный, геометрический).

Машиностроительный метод применяется для конструирования механизмов с большими механическими нагрузками.

Наличие в конструкции больших механических нагрузок или больших мощностей может вызвать высокие скорости перемещения отдельных частей механизмов. Для ограничения этих скоростей, уменьшения потерь энергии и устранения быстрого износа опор машиностроительный метод предлагает замыкание форм поверхностей. В подвижных соединениях это вызывает появление зазора, а в неподвижных - большие напряжения. Кроме того, в данном методе точность движения и взаимное расположение деталей обеспечивается высокой степенью точности их изготовления.

Геометрический метод применим для жестких конструкций, в которых деформация при воздействии дестабилизирующих факторов намного меньше погрешности изготовления деталей. Этот метод с успехом может быть применен для конструирования ЭС, где требуется обеспечение точного взаимного положения деталей или перемещений.

При геометрическом методе элементы конструкции с механическими связями соединяются между собой при помощи механических контактов, которые являются точками опоры. Точки опоры должны располагаться так, чтобы каждая ограничивала перемещение элемента конструкции в одном направлении. Поэтому на одной прямой не нужно применять более двух точек опоры, так как большее число точек не изменит положение тела. Основой геометрического метода является структура механических связей между элементами

конструкции, представляющая систему точек, число и размещение которых зависит от степени свободы и геометрических законов твердого тела.

Конструкции, созданные геометрическим методом, мало пригодны для работы при больших механических нагрузках, так как число точек опоры не зависит от числа и величины действующих сил в конструкциях, а выбираются в соответствии с требуемым положением тела.

Выбор метода конструирования определяется многими фактами: технологичностью конструкции; требованием надежности; количеством нормализованных, стандартизованных и унифицированных деталей и узлов; выбором метода монтажа.

Особенно обдуманно нужно подходить к выбору материалов при создании конструкции. Материалы, используемые в элементах ЭС можно разделить на изоляционные, проводниковые, контактные и конструкционные. С учетом влажности все материалы изменяют и механические, и электрические свойства. Для изоляционных материалов при длительном пребывании в условиях повышенной влажности характерно ухудшение электрических характеристик.

Для проводниковых материалов характерным является то, что в условиях повышенной влажности происходит окисление и коррозия проводника, в результате чего изменяется его сечение. У контактных и конструкционных материалов под действием влаги наблюдаются коррозия и окисление, поэтому применяется влагозащита полимерными материалами, а именно: пропитка, заливка, обволакивание, опрессовка и консервация.

Пропитка и заливка осуществляются лаками и компаундами, обволакивание и опрессовка - компаундами и пластмассами. Консервация осуществляется в основном полимерными пленками. Характеристики лаков, компаундов, пластмасс даны в табл. 5.1.

Применение получила технология нанесения полимерных покрытий из газовой фазы в вакууме. Структура пленки, получаемой вакуумным осаждением, благодаря отсутствию отверстий существенно отличается от структуры и свойств пленки, получаемой из жидких сред, и обеспечивает влагозащитные свойства при толщине нанесенного слоя 10 мкм.

Процесс имеет три этапа:

- сублимации при температуре 150 °С;
- получение мономера путем пиролиза при температуре 680 °С;
- осаждением мономера на поверхность.

Чаще всего используют полипараксиленовые покрытия (ППКП). Их преимущества - высокие электроизоляционные свойства, малые газо- и влагопроницаемость, возможность формирования покрытия при нормальных температурах, отсутствие токсичности.

Т а б л и ц а 5.1. Влажностные характеристики лаков, компаундов и пластмасс

Вещество	Коэффициент диффузии D, см ² /г	Коэффициент влагопроницаемости p, г/(см·торр·г)	Коэффициент растворимости h, г/(см ³ ·торр)
Лаки:			
СБ-1-С	$8,3 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
УР-231	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
Э-4100	$7,6 \cdot 10^{-6}$	$5,5 \cdot 10^{-10}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$
К-47	-	$3,8 \cdot 10^{-8}$	-
Компаунды:			
Эпоксидные компаунды			
Э-2200	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
К-115	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$
Кремний-органический компаунд			
КТМ	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-9}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$
КТ-КРО	$8,4 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$
Пластмассы:			
К-211-34	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
ФКП-32	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$

5.2. Технологические процессы, применяемые при изготовлении РЭС

Зачастую создание конструкций, построенных на новых принципах, связано с применением новых технологий, свойства и возможности которых еще хорошо не изучены. В этих условиях разработка конструкций должна осуществляться с непосредственным участием технологов при одновременной отработке и конструкций, и технологии.

Рассмотрим основные технологические процессы, применяемые при изготовлении РЭС.

Холодная штамповка является наиболее производительным и экономически эффективным способом получения заготовок и деталей при их массовом производстве. В составе многих изделий в автомобильной промышленности насчитывается до 70% деталей, изготовленных при помощи операций холодной штамповки. Типовыми представителями таких деталей являются: пластины, корпусные детали, панели, пружины из проволоки, крепежные детали и др.

Все работы холодной штамповки разделены на следующие основные группы.

Технология холодной штамповки и конфигурация инструмента устанавливаются в зависимости от размеров и формы штампуемой детали, точности штамповки, а также от программы производства.

Проектирование технологического процесса холодной штамповки включает следующие основные этапы: изучение чертежа детали и анализ технологичности конструкции детали; определение формы и размеров заготовки; определение рационального раскроя; составление плана технологического процесса; расчет усилий и выбор оборудования для каждой операции; определение операционных размеров; оформление технологических карт; проектирование штампов.

Под *технологичностью детали* следует понимать такое сочетание основных элементов ее конструкции, которое обеспечивает наиболее простое изготовление в производстве и высокие качества эксплуатации.

К деталям, получаемым *вырубкой и пробивкой*, предъявляются следующие требования по технологичности. Конфигурация внешнего контура должна быть такой, чтобы количество отходов было минимальным. Одновременно с этим она должна также обеспечивать наиболее высокую стойкость штампа при наименьшей его стоимости. Для выполнения этих требований необходимо соблюдать следующие основные правила оформления конфигурации деталей:

- форма детали должна быть по возможности простой, без резких переходов, узких и длинных открытых прорезей и консольных участков;
- стороны вырубаемого контура должны сопрягаться плавными кривыми возможно большего радиуса;
- минимальные размеры пробиваемых отверстий должны быть согласованы с их формой и механическими свойствами материала детали;
- при пробивке отверстий в согнутых и вытянутых деталях необходимо выдержать определенное расстояние между ними и вертикальной стенкой детали, во избежание набега края отверстия на сопряженную часть стенок;
- следует стремиться к тому, чтобы не назначать допусков повышенной точности, т.к. это приводит к повышенной стоимости штампа.

К деталям, получаемым *гибкой*, предъявляются определенные требования по технологичности: правильный выбор внутренних радиусов гибки, радиусов сопряжения боковых полок с дном и размерами этих полок. Для точного фиксирования заготовки в гибочном штампе следует в деталях предусмотреть технологические отверстия.

Основные требования, предъявляемые к деталям, получаемым путем вытяжки и формовки, заключаются в следующем:

- правильный выбор радиусов сопряжения дна, стенок и фланцев;
- при конструировании деталей, получаемых вытяжкой, следует стремиться к возможно меньшей высоте, с тем чтобы деталь можно было получить за одну операцию;

- при получении деталей вытяжкой не допускать складкообразование, образующееся в результате действий сжимающих напряжений.

Заготовки для деталей, полученных холодной штамповкой, чаще всего получают из листов или лент, изготовленных согласно стандартам. Стандарты на листы и ленты приведены в сборниках государственных стандартов. В этих стандартах приводятся сортамент (габариты, толщина, точность), марки материала и технические требования.

5.3. Расчеты тепловых режимов РЭС

Конечной целью конструкторской разработки является выпуск конкурентноспособной продукции, которая должна быть обеспечена за счет ее высокого качества, надежности, технологичности и низкой себестоимости. Сложность разработки такого изделия обусловлена начальной неопределенностью исходных данных

На различных стадиях конструирования эта неопределенность постепенно уменьшается. Значит разработка РЭС - это комплексное проектное решение схем, конструкций и технологий, в которое входят расчеты, моделирование, макетирование, изготовление и испытание опытных образцов.

Одним из важнейших факторов, определяющих надежность РЭС, является тепловой режим, обеспечение которого связано с выбором конструкции блока, ячейки, печатной платы, которые должны способствовать рассеиванию теплоты в окружающую среду. Расчет теплового режима проводится с целью проверки обеспечения нормального режима работы конструкции при выбранной системе охлаждения:

- естественно-воздушная;
- принудительно-воздушная или жидкостная;
- жидкостная или испарительная.

Поэтому расчет должен заканчиваться или определением температуры электрорадиоэлементов, или определением температуры в центре нагретой зоны в случае равномерно расположенных источников тепла. Для некоторых классов конструкций расчет теплового режима может быть закончен определением среднеповерхностных температур корпуса и нагретой зоны и приближенной оценкой температуры в центре нагретой зоны. Расчет теплового режима проводится по тепловой модели конструкции, полученной в результате рассмотрения объекта исследования, выявляя ее теплофизические свойства и идеализируя процессы теплообмена.

Для расчета тепловых режимов блоков ЭС необходимо иметь сведения о конструкции, т.е. знать основные размеры блока, материалы, из которых он изготовлен, и сведения об окружающей среде, т.е. условиях эксплуатации. Расчет тепловых режимов включает расчет тепловой характеристики, которая представляет собой зависимость температуры блока (или его поверхности) от

величины мощности, рассеиваемой блоком. Для расчета широкое применение получили методы с использованием тепловой модели блока с нагретой зоной.

Нагретая зона - это часть объема, занятая шасси или платами и смонтированными на них элементами. Радиоаппаратура может иметь одну или несколько нагретых зон.

За нагретую зону принимают параллелепипед, площадь основания которого совпадает с площадью шасси, а высота равна средней высоте смонтированных на плате деталей (рис. 5.1).

$$h_2 = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{l_1 \cdot l_2} ; \quad l_1 \cdot l_2 = S_{ш} ,$$

где V_i - объем элемента в нагретой зоне; n - число элементов в нагретой зоне; h - высота блока; h_1 - высота свободного объема от крышки до нагретой зоны; h_3 - высота свободного объема от нагретой зоны до дна кожуха.

В задании может быть предусмотрен расчет либо герметичного, либо перфорированного аппарата. Рассмотрим расчет тепловых режимов герметичных блоков. Классификация условий работы представлена в табл. 5.2.

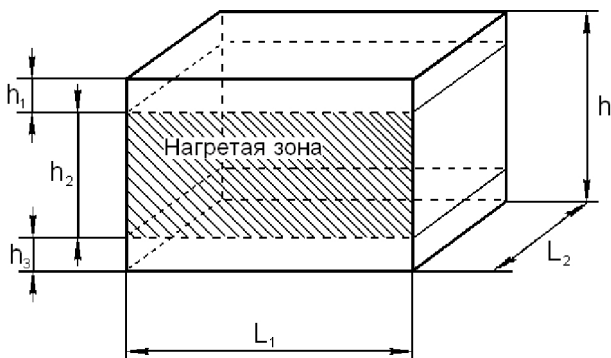


Рис. 5.1. Схематехническая тепловая модель электронного блока

Исходные данные для расчетных характеристик блока ЭС: t_c - температура среды, °С; L_1, L_2 - длина и ширина кожуха, м; h - высота кожуха, м; $S_{кр}, S_{дн}, S_б$ - площади наружных поверхностей крышки, дна и боковой поверхности, м²; l_1, l_2 - длина и ширина шасси, см; S_1, S_3 - площади внутренних поверхностей крышки и дна кожуха, м²; $S_{ш}$ - площадь шасси, м²; h_1, h_2, h_3 - высота от крышки до нагретой зоны, самой нагретой зоны и от зоны до дна, см; $\varepsilon_{кр}, \varepsilon_{дн}, \varepsilon_б$ - степень черноты боковых наружных поверхностей, наружных поверхностей крышки дна кожуха; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - степень черноты внутренних поверхностей крышки и дна кожуха; $\varepsilon_{ш1}, \varepsilon_{ш2}$ - степень черноты на-

гретой зоны блока сверху и снизу; Δ - толщина материала кожуха; H - давление окружающей среды.

Группа 1 - электронные средства в открытых наземных и подземных помещениях с повышенной относительной влажностью, для корабельных ЭС, расположенных на верхней палубе.

Группа 2 - ЭС в специально оборудованных отапливаемых во время работы помещениях.

Группа 3 - ЭС, находящаяся в неотапливаемых помещениях.

Группа 4 - аппаратура в танках.

Таблица 5.2. Условия работы ЭС различного назначения

Воздействующие факторы	Вид и группа						
	Наземная				Самолетная		Корабельная
	1	2	3	4	1	2	3
Вибрации с частотой, Гц	2-80	2-80	2-80	15-120	3-400	3-400	5-35
Ускорение не более, g	4-1	4-1	6-3	6-2	2-10	2-10	1,5
Ускорение при ударе, g	10	20-75	100-120	-	5	10	7
Ветер со скоростью, м/с	30	30	30	30	-	-	10
Относит. влажность, %	98	98	98	98	98	98	98
Температура, °C	30	40	40	40	40	40	40
Изменение температуры, °C	-45 +50	-50 +65	-50 +65	-50 +65	-65 +65	-60 +80	-50 +65
Атмосф. давление, ГПа	-	110	110	110	110	56	-
Слой воды, см	-	-	-	50	50	-	50
Водные брызги	5	5	5	5	5	5	5
Воздушный поток с пылью, м/с	-	-	-	10-15	10-15	10-15	-

Проведем расчет зависимости $t = f(P)$ в первом приближении.

Определяем геометрические размеры:

$$S_{KP} = S_{ДН} = L_1 \cdot L_2; \quad S_{\sigma} = 2h \cdot (L_1 + L_2); \quad l_1 = L_1 - 2\Delta; \quad l_2 = L_2 - 2\Delta,$$

где S_{21} и S_{23} - площади поверхностей нагретой зоны в областях 1 и 3.

Целью дальнейшего расчета является определение зависимости

$$P = \alpha \cdot S \cdot \Delta t_k,$$

где P - мощность, рассеиваемая аппаратом, Вт; α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·град); S - площадь поверхности кожуха, м².

Для расчета температуры в первом приближении принимаем

$$t_{KP} = t_{ДН} = t_{\delta} = t_{кож}$$

и задаемся перегревом кожуха, тогда

$$\Delta t_k = t_k - t_c; \quad t_k = \Delta t_k + t_c,$$

где Δt_k - температура перегрева кожуха относительно окружающей среды, °С.

$$S_1 = 2h_1[(L_1 + L_2 - 4\Delta) + (L_1 - 2\Delta)(L_2 - 2\Delta)];$$

$$S_2 = 2h_2(l_1 + l_2);$$

$$S_3 = 2h_3[(L_1 + L_2 - 4\Delta) + (L_1 - 2\Delta)(L_2 - 2\Delta)].$$

Коэффициент теплоотдачи α представляет собой сумму двух коэффициентов, значение одного из которых определяется характером конвективных потоков, а другого - излучением поверхности кожуха:

$$\alpha = \alpha_K + \alpha_L.$$

Коэффициент теплоотдачи излучения определяется зависимостью

$$\alpha_L = \varepsilon \cdot f(t_k, t_c),$$

где ε - степень черноты наружной поверхности кожуха; $f(t_k, t_c)$ - функция, зависящая от температуры, вычисляется по формуле

$$f(t) = C_0 \cdot \frac{(t_k + 273,2)^4 - (t_c + 273,2)^4}{t_k - t_c},$$

здесь ε - степень черноты поверхности тела; C_0 - коэффициент лучеиспускательной (поглощательной) способности абсолютно черного тела, $C_0 = 5,73 \cdot 10^{-4}$ Вт/(м²·град⁴).

Конвективные слагающие коэффициента теплоотдачи зависят от ориентации поверхностей в пространстве.

Для боковой поверхности

$$\alpha_{к.б} = 5,62A \cdot \frac{K}{M(L)} \cdot \sqrt{\frac{H}{H_0}}.$$

Для крышки кожуха

$$\alpha_{к.кр} = 7,3 \cdot A \frac{K}{M(L)} \cdot \sqrt{\frac{H}{H_0}}.$$

Для дна кожуха

$$\alpha_{к.дна} = 3,96 \cdot A \frac{K}{M(L)} \cdot \sqrt{\frac{H}{H_0}},$$

где в формулах приведены следующие обозначения: A - коэффициент, зависящий от физических свойств воздуха и изменяющийся с изменением средней температуры

$$t_m = (t_k + t_c) / 2;$$

отношение $\sqrt{\frac{H}{H_0}}$ участвует в определении α_k , если условия эксплуатации отличаются от нормальных условий.

Условия, при которых $H = 10322 \text{ кг/м}^2$ (110 кПа.) и $t^\circ = 20^\circ\text{C}$, называют нормальными условиями.

В отношении

$$\sqrt{\frac{H}{H_0}},$$

H - заданное давление; H_0 - давление при нормальных условиях.

Коэффициенты $A = f(t_m)$; $M = f(L)$, $K = f(\Delta t)$ определяются по графикам, показанным на рис.5.2, 5.3, 5.4.

Коэффициенты $A = f(t_m)$; $M = f(L)$, $K = f(\Delta t)$ определяются по графикам, показанным на рис.5.2, 5.3, 5.4.

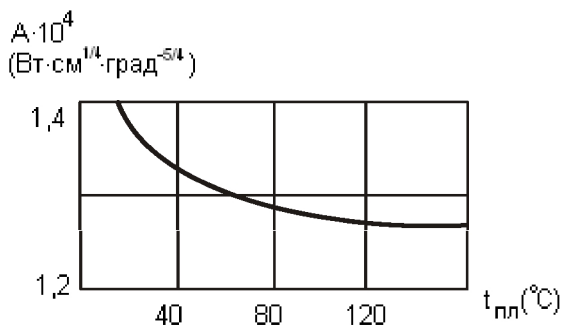


Рис. 5.2. Зависимость коэффициента $A = f(t_m)$

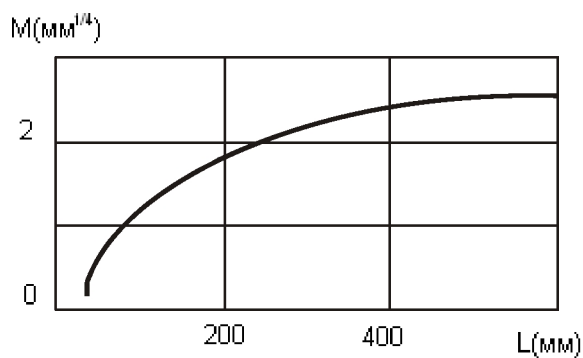


Рис. 5.3. Зависимость коэффициента $M=f(L)$

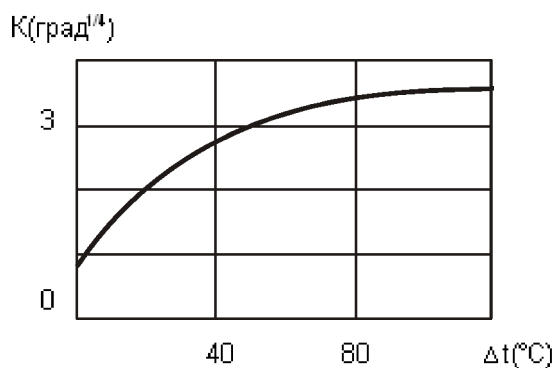


Рис. 5.4. Зависимость коэффициента $K=f(\Delta t)$

$B \cdot 10^{-4}$
($\text{Вт}/\text{см}^{1/4} \cdot \text{град}$)

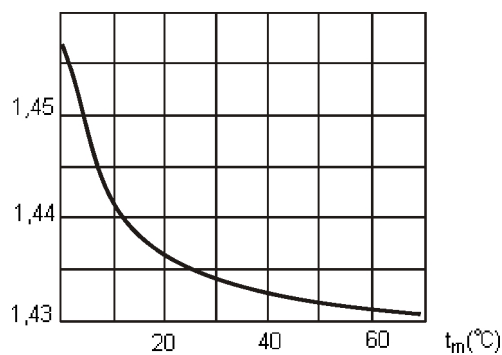


Рис. 5.5. Зависимость коэффициента $B=f(t_m)$

При расчете $\alpha_{к.б}$ за определяющий размер принимается высота блока h , а при расчете $\alpha_{к.кр}$ и $\alpha_{к.дн}$ нужно за определяющий размер принимать меньшую из сторон L_1 или L_2 .

Далее находится полный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_i = \alpha_{ик} + \alpha_{ин}$$

и соответствующие мощности

$$P_i = \alpha_i \cdot S_i \cdot \Delta t,$$

где $\Delta t = t_k - t_c$.

После чего можно найти суммарную мощность, выделяемую в блоке и температуру нагретой зоны в первом приближении:

$$P = P_{кр} + P_{дн} + P_{бок}; \quad t_{ш} = t_k + 2,5 \cdot \Delta t.$$

В заключение расчета первого приближения нужно отметить, что для $\alpha_{ки}$ предварительно необходимо найти закон теплообмена, который определяется по формуле

$$\Delta t \leq \left[\frac{0,84}{L_{опред}} \right]^3, \quad (5.4)$$

где $L_{опред}$ - определяющий размер, мм.

Если это неравенство выполняется, то теплообмен подчиняется закону $1/4$, в противном случае теплообмен подчиняется закону $1/3$. Графики на рисунках 5.2, 5.3, 5.4 соответствуют закону $1/4$.

Если теплообмен подчиняется закону $1/3$ степени, мощность рассеивания определяется соотношением

$$P_k = A(S_б + 1,3S_{кр} + 0,7S_{дн}) \Delta t^{4/3}, \quad (5.5)$$

где A - коэффициент, зависящий от температуры (см. табл. 5.2).

Таблица 5.2. Зависимость коэффициента A от температуры

$t_m, ^\circ\text{C}$	0	20	40	60	80	100	150
A	1,69	1,61	1,53	1,45	1,39	1,33	1,23

Для определения мощности, рассеиваемой облучением, пользуются формулой

$$P_{изл} = 5,67 \cdot S_k \cdot \left[\left(\frac{273 + t_c + \Delta t_k}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_c}{100} \right)^4 \right],$$

где

$$S_k = 2 \cdot S_б + 2 \cdot (1,3 \cdot S_{кр}) + 2 \cdot (0,7 \cdot S_{дн}).$$

Общая мощность

$$P = P_{\kappa} + P_{изл}.$$

На этом заканчивается расчет первого приближения.

Проведем расчет зависимости $t = f(P)$ во втором приближении.

В этой части расчета учитываются некоторые дополнительные условия. Теплообмен внутри блока осуществляется за счет конвекции и излучения. В справочниках даны ϵ для тех случаев, когда поверхности излучают тепло в открытое пространство, т.е. для случаев, когда отражение лучей отсутствует. В блоках же происходит отражение тепловых лучей, что эквивалентно изменению степени черноты внутренних поверхностей. Новое значение степени черноты принято называть приведенной степенью черноты (ϵ_{np}).

Найдем ϵ_{np} для отсеков блока:

$$\epsilon_{npi} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}; \quad \epsilon_{np2} = \epsilon_{np1} \cdot \epsilon_{np3}.$$

Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием для верхнего и нижнего отсеков вычисляется по формулам:

$$\text{для верхнего отсека} \quad \alpha_{n1} = \epsilon_{np1} f_1(t_{ш}^1, t_n);$$

$$\text{для нижнего отсека} \quad \alpha_{n3} = \epsilon_{np3} f_1(t_{ш}^1, t_n);$$

$$\text{для нагретой зоны} \quad \alpha_{n2} = \epsilon_{np2} f_1(t_{ш}^1, t_n).$$

В значение функции вместо температуры кожуха нужно взять температуру нагретой зоны, полученную в первом приближении, а за температуру среды принять температуру кожуха.

Рассчитаем конвективный теплообмен во втором приближении.

В верхнем отсеке кроме теплообмена излучением происходит конвективный теплообмен, а в нижнем отсеке конвекция практически отсутствует, так как нет перемешивания воздуха. Тогда коэффициент теплоотдачи конвекцией для верхнего отсека может быть найден по формуле

$$\alpha_{K1} = B \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta t}{h_1}} \cdot \sqrt{\frac{H}{H_0}},$$

где $\alpha_{K1} = \alpha_{K2}$, так как шасси ориентировано горизонтально; B - величина, характеризующая свойства воздуха в зависимости от средней температуры t_m , график зависимости показан на рис. 5.5.

Здесь

$$t_m = \frac{(t_{ш}^1 + t_K)}{2}; \quad \Delta t = t_{ш}^1 - t_K.$$

Для нижнего отсека
$$\alpha_{\kappa, \partial H} = \frac{\lambda_{\text{возд}}}{h_3},$$

где $\lambda_{\text{возд}}$ - коэффициент теплопроводности воздуха.

Далее находим полный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_I = \alpha_{\text{ли}} + \alpha_{\kappa I}$$

После чего определяем тепловые проводимости кожуха и зоны по формулам:

$$\sigma_{\kappa} = \sum_i \alpha_i \cdot S_{\kappa i},$$

где $S_{\kappa i} = S_{\kappa p} + S_{\kappa \text{он}} + S_{\kappa \text{бок}}; \quad \sigma_{\kappa} = 23(L_1 - 2\Delta) \cdot (L_2 - 2\Delta).$

Далее находим температуру зоны во втором приближении:

$$t_{\text{из}}^{\text{II}} = t_{\text{с}} + P \cdot \left(\frac{1}{\sigma_3} + \frac{1}{\sigma_{\kappa}} \right).$$

Если температура зоны $t_{\text{из}}^{\text{II}}$ значительно отличается от температуры $t_{\text{из}}^{\text{I}}$, то расчет повторяется в третьем приближении по методике второго приближения. Допустимое значение отклонения температур составляет $2 \dots 3^{\circ}\text{C}$.

Вторая точка тепловой характеристики находится аналогично, но при другой выбранной температуре перегрева кожуха - Δt_{κ} . По найденным точкам строится тепловая характеристика

$$\Delta t_{\text{из}} = f(P) \text{ и } \Delta t_{\kappa} = f(P),$$

и определяется перегрев блока при определенной заданной мощности блока P .

Учитывая, что отдельные элементы конструкции могут находиться в зонах, температура которых может быть больше $t_{\text{из}}$, необходимо элементы выбирать на температуру $t_{\text{оem}} = 1,3 t_{\text{из}}$.

Для снижения температуры нагретой зоны и кожуха можно применять перфорацию кожуха и шасси аппарата.

Отверстия нужно располагать при этом симметрично нагретой зоне и дальше от нее. Площадь отверстий в шасси может составлять не более 5-6% полной площади нагретой зоны, а общая площадь отверстий в кожухе - около 20 ... 25% полной его поверхности.

Перфорация снижает температуру кожуха и шасси примерно на 20 ... 30%.

5.4. Цифровое моделирование температурных полей РЭС

Одной из важнейших задач, поставленных перед разработчиками и конструкторами электронных средств, является интенсификация процесса создания устройств на основе применения систем автоматического проектирования. В этом случае анализ температурного поля устройства составляет подсистему

«тепловые режимы». Эта подсистема теплового проектирования включает в себя следующие разделы:

- способы моделирования температурных полей сложных устройств и их математическое описание;
- методы автоматизированного теплового проектирования и расчета РЭС в различных условиях его эксплуатации;
- полную систему теплового проектирования.

Среди конструкторов РЭС все большее распространение для расчета температурного поля получает метод конечных разностей, или цифровое моделирование температурных полей. Его можно было бы назвать и методом кубиков, поскольку в основе его лежит построение моделей сложных физических процессов, происходящих в больших объемах пространства, состоящих из простых элементарных процессов, происходящих в малом объеме кубической формы.

Суть этого метода в следующем. Конструкция разбивается на части прямоугольной формы, которые назовем элементами. Для повышения точности расчета и облегчения составления программы все элементы следует делать одинаковых размеров. В центре элемента выделяется точка - узел сетки, в котором и вычисляется температура. В интервале между узлами температура считается изменяющейся по линейному закону, т.е. температура в такой модели будет кусочно-линейной функцией координат, что показано на рис.5.6 .

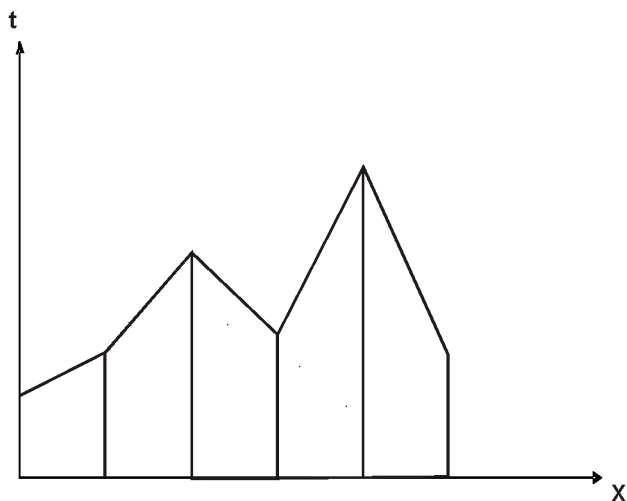


Рис. 5.6. Кусочно-линейная аппроксимация изменения температуры

Далее дифференциальные уравнения, описывающие тепловые явления, заменяются на уравнения в конечных разностях, т.е. дифференциалы заменяются на приращения в соответствующих точках.

Например, уравнение теплопроводности изотропного тела в дифференциальной форме:

$$\lambda \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + q_v = C_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau},$$

где λ - коэффициент теплопроводности материала; t - температура; q_v - удельная мощность выделения внутренних источников; C_p - теплоемкость тела при постоянном давлении; ρ - плотность; τ - время.

В конечных разностях это уравнение имеет вид

$$\lambda \left(\frac{\Delta \left(\frac{\Delta t_x}{l_x} \right)}{l_x} + \frac{\Delta \left(\frac{\Delta t_y}{l_y} \right)}{l_y} + \frac{\Delta \left(\frac{\Delta t_z}{l_z} \right)}{l_z} \right) + q_v = C_p \cdot \rho \cdot \frac{\Delta t_\tau}{\tau},$$

где l_x, l_y, l_z - приращения по координатам;

$$\Delta t_x^+ = t_{i-1,j,k} - t_{i,j,k} \quad \text{или} \quad \Delta t_x^- = t_{i,j,k} - t_{i+1,j,k}$$

($t_{i,j,k}$ - температура в элементе с индексами i, j, k);

аналогично для других координат:

$$\Delta t_y^+ = t_{i,j-1,k} - t_{i,j,k} \quad \text{или} \quad \Delta t_y^- = t_{i,j,k} - t_{i,j+1,k};$$

$$\Delta t_z^+ = t_{i,j,k-1} - t_{i,j,k} \quad \text{или} \quad \Delta t_z^- = t_{i,j,k} - t_{i,j,k+1}.$$

Величины с "+" относятся к входящим, а с "-" - к выходящим потокам тепла.

На рис. 5.7 показаны $J_x^+, J_x^-, J_y^+, J_y^-, J_z^+, J_z^-$ плотности потоков по координатам x, y, z соответственно, а $\Delta t_\tau / \tau$ - изменение температуры в элементе с индексами i, j, k за момент времени τ .

Данное уравнение легко решается от начального момента времени до интересующего времени работы устройства через равные кванты времени m . Обычно за начальный момент времени берется момент включения аппаратуры, в этот момент времени ($\tau = 0$) температура в элементах равна температуре окружающей среды τ_c . Через момент времени τ определяется температура в узлах, где происходит выделение тепла, в остальных же она пока равна t . Так, обходя все узлы по порядку, можно определить температуру в них в любой момент времени.

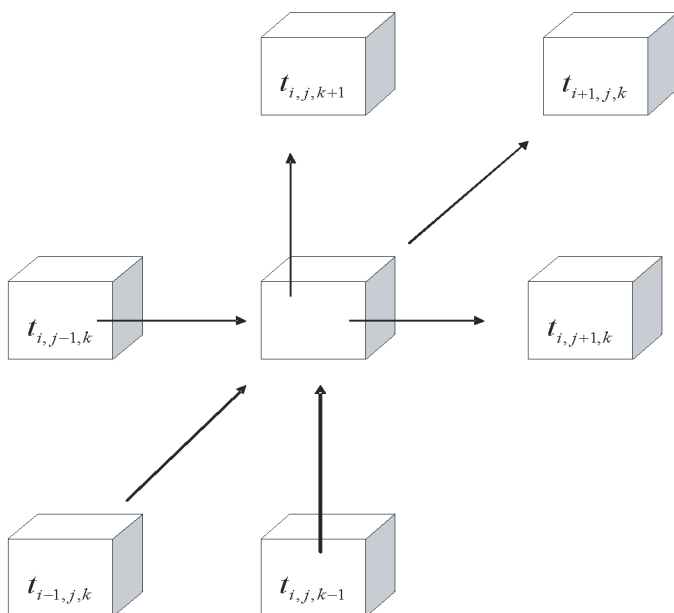


Рис. 5.7. Распределение тепла в нескольких элементах

Радиоаппаратуру можно рассматривать как систему многих тел с сосредоточенными источниками тепловой энергии. Анализ температурных полей таких систем является сложной задачей, решение которой выполняется приближенными методами. Исследователь устанавливает количественную зависимость между температурами ограниченного числа наиболее ответственных мест конструкции и существенными факторами, влияющими на процесс теплообмена. При экспериментальном решении задачи эта работа может проводиться на самом объекте исследования; аналитическое решение исключает такой подход, так как тепловые процессы в реальной конструкции, как правило, не поддаются точному математическому описанию из-за наличия большого числа основных и дополнительных факторов, влияющих на протекание процесса. Поэтому необходим переход к модели конструкции. В настоящее время получили распространение две группы тепловых моделей РЭС. На рис. 5.8. схематично показаны тепловые модели первой и второй группы.

Характерной особенностью моделей первой группы является разделение поверхностей модели ЭС на отдельные условно-изотермические участки. Процесс переноса тепла в таких моделях рассматривается так, как если бы он протекал между изотермическими поверхностями.

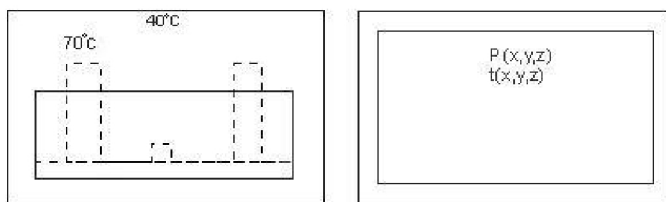


Рис. 5.8. Виды тепловых моделей ЭС:
а - тепловая модель I группы; б - тепловая модель II группы

В тепловых моделях второй группы нагретая зона ЭС, представляющая собой неоднородную систему многих тел, идеализируется в виде однородного тела. Свойства этого тела характеризуются эффективными значениями теплофизических параметров - коэффициента теплопроводности $A_{\text{эюз}}$ и коэффициента теплоемкости $C_{\text{экв}}$. Здесь нагретая зона - однородное анизотропное тело с распределенными по объему источниками энергии. Информационные возможности такой модели весьма велики, так как ее исследование позволяет получить аналитическое выражение для поля температур. В настоящей работе для расчета температурного поля объекта исследования используется модель второй группы, но для увеличения точности расчета осредненных теплофизических параметров конструкция не идеализируется как одно анизотропное тело, а делится на несколько анизотропных зон.

Электронное средство - многокомпонентная структура с различными теплофизическими параметрами; чтобы рассчитать температурный режим такой конструкции, необходимо перейти к модели второй группы. Выполняется этот переход следующим образом.

Разобьем объект исследования на n элементов или n элементарных объемов. В каждом таком элементе может находиться какой-либо однородный материал, либо несколько различных материалов, из которых состоит объект исследования (радиоэлемент, компаунд, плата, корпус, кронштейн и т.д.), т.е. материалы с различными теплофизическими параметрами λ_i, C_i .

Рассмотрим такой элементарный объем отдельно, так как для каждого такого объема необходимо найти осредненные теплофизические параметры. Разобьем этот элемент на области так, чтобы в каждую область вошел какой-либо один однородный материал.

Структура разбиения следующая: V_1 - однородная структура с λ_1, C_1 ; V_2 - однородная структура с λ_2, C_2 и т.д.

Значит $V_0 = \sum V_i$.

Линейные размеры $h_1; h_2; h_3; \dots; h_i$ определяются:

$$h_1 = \sqrt[3]{V_1}; \quad h_2 = \sqrt[3]{V_1 + V_2} - \sqrt[3]{V_1}; \quad \dots;$$

$$h_i = \sqrt[3]{V_i + V_{i-1} + \dots + V_1} - \sqrt[3]{V_{i-1} + V_{i-2} + \dots + V_1}.$$

Основной параметр при расчете температурного поля - тепловое сопротивление - может быть определено:

$$R_{TCT} = \sum_{i=1}^n R_{CЛ_i} = \frac{1}{S_{CЛ_i}} \cdot \left(\frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{h_n}{\lambda_n} \right) = \frac{A}{S_i};$$

$$S_{CЛ_1} = h_1^2; \quad S_{CЛ_2} = h_2(2h_1 + h_2);$$

.....

$$S_{CЛ_n} = h_n[2(h_1 + h_2 + \dots + h_{n-1}) + h_n].$$

Для этого элемента с объемом V_0 тепловое сопротивление

$$R_{T\Sigma} = \int_0^h \frac{dh}{\lambda S} = \frac{1}{\lambda_{\text{экв}} \cdot h_{\text{куб}}}.$$

Приравнявая две величины R_{TCT} и $R_{T\Sigma}$, можно найти осредненный теплофизический параметр $\lambda_{\text{экв}}$:

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{(h_1^2 + h_2^2 + \dots + h_n^2) \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n}{h_{\text{куб}} \cdot ((\lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n) h_1 + (\lambda_1 \lambda_3 \dots \lambda_n) h_2 + \dots)}$$

или более общее выражение

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i^2 \prod_{j=1}^n \lambda_j}{h_{\text{куб}} \sum_{i=1}^n \left(h_i \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \lambda_j \right)}.$$

Вторым теплофизическим параметром, влияющим на тепловой режим объекта исследования, является теплоемкость $C_{\text{экв}}$. Для указанного разбиения в каждой части элемента массы будет накапливаться тепло, равное

$$q_1 = C_1 V_1 \Delta t; \quad q_2 = C_2 V_2 \Delta t; \quad q_n = C_n V_n \Delta t.$$

А общее количество теплоты, которое может накопить рассматриваемый элемент массы,

$$q = (C_1V_1 + C_2V_2 + \dots + C_nV_n)\Delta t.$$

Если заменить этот неоднородный элемент однородным, но уже с осредненным значением теплоемкости C , то количество теплоты в нем - q - не должно измениться, т.е.

$$q = C_{\text{экв}} V_0 \Delta t.$$

Таким образом, значение эквивалентной теплоемкости определяется выражением:

$$C_{\text{экв}} = \frac{C_1V_1 + C_2V_2 + \dots + C_nV_n}{V_0}.$$

Расчет температурного поля в модели второй группы.

Вернемся к рис. 5.7, только будем считать, что в каждом элементе уже найдены $\lambda_{\text{экв}}$ и $C_{\text{экв}}$ по предложенным выше формулам. Известно, что типовым уравнением движения энергии является закон сохранения энергии: количество притекающей к данному элементу энергии равно количеству энергии, накапливающейся в элементе. Этот закон, как правило, записывается через величину плотности теплового потока:

$$\frac{J_X^+ - J_X^-}{l_X} + \frac{J_Y^+ - J_Y^-}{l_Y} + \frac{J_Z^+ - J_Z^-}{l_Z} + q = C_{\text{экв}} \frac{t(\tau + \Delta\tau) - t}{\tau}.$$

Здесь $J_X^+, \dots, J_Z^-$ - удельные плотности тепловых потоков; l_X, l_Y, l_Z - линейные размеры элемента вдоль осей; $C_{\text{экв}}$ - осредненная теплоемкость элемента; τ - интервал времени; $t(\tau + \Delta\tau) - t$ - приращение температуры за интервал времени.

Для анизотропной модели

$$J_X^+ = \frac{t_X^+ - t_0}{R_{T\Sigma}},$$

$$\text{где } R_{T\Sigma} = \frac{l_X}{2S} \left(\frac{1}{\lambda_{0\text{экв}}} + \frac{1}{\lambda_{X\text{экв}}^+} \right) = \frac{1}{2l} \left(\frac{\lambda_{0\text{экв}} + \lambda_{X\text{экв}}^+}{\lambda_{0\text{экв}} \cdot \lambda_{X\text{экв}}^+} \right).$$

Обозначим

$$K_{0X\text{экв}}^+ = \frac{\lambda_{0\text{экв}} \cdot \lambda_{X\text{экв}}^+}{\lambda_{0\text{экв}} + \lambda_{X\text{экв}}^+},$$

$$\text{т.е. } J_X^+ = 2l \cdot K_{0X\text{экв}}^+ \cdot (t_X^+ - t_0).$$

Аналогично для всех направлений x, y, z . За время $\Delta\tau$ изменение температуры будет:

$$\Delta t_{0X}^+ = \frac{\Delta \tau \cdot J_X^+}{C_{0\text{ЭКВ}}} = \frac{\Delta \tau}{C_{0\text{ЭКВ}}} \cdot 2l \left[K_{0X\text{ЭКВ}}^+ \cdot (t_X^+ - t_0) \right] ;$$

$$\Delta t_{0X}^- = \frac{\Delta \tau \cdot J_X^-}{C_{0\text{ЭКВ}}} = \frac{\Delta \tau}{C_{0\text{ЭКВ}}} \cdot 2l \left[K_{0X\text{ЭКВ}}^- \cdot (t_X^- - t_0) \right] ;$$

$$\Delta t_{0Y}^+ = \frac{\Delta \tau \cdot J_Y^+}{C_{0\text{ЭКВ}}} = \frac{\Delta \tau}{C_{0\text{ЭКВ}}} \cdot 2l \left[K_{0Y\text{ЭКВ}}^+ \cdot (t_Y^+ - t_0) \right] ;$$

$$\Delta t_{0Y}^- = \frac{\Delta \tau \cdot J_Y^-}{C_{0\text{ЭКВ}}} = \frac{\Delta \tau}{C_{0\text{ЭКВ}}} \cdot 2l \left[K_{0Y\text{ЭКВ}}^- \cdot (t_Y^- - t_0) \right] ;$$

$$\Delta t_{0Z}^+ = \frac{\Delta \tau \cdot J_Z^+}{C_{0\text{ЭКВ}}} = \frac{\Delta \tau}{C_{0\text{ЭКВ}}} \cdot 2l \left[K_{0Z\text{ЭКВ}}^+ \cdot (t_Z^+ - t_0) \right] ;$$

$$\Delta t_{0Z}^- = \frac{\Delta \tau \cdot J_Z^-}{C_{0\text{ЭКВ}}} = \frac{\Delta \tau}{C_{0\text{ЭКВ}}} \cdot 2l \left[K_{0Z\text{ЭКВ}}^- \cdot (t_Z^- - t_0) \right] .$$

При условии, что время $\Delta \tau$ много меньше постоянной времени ячейки:

$$\Delta \tau \leq C_{0\text{ЭКВ}} \cdot R_{T\Sigma} = \frac{C_{0y\partial} j V_0}{2l \cdot K_{0X\text{ЭКВ}}^i} ,$$

где j - удельный вес, вводится для получения объемной теплоемкости; V_0 - объем ячейки.

За время $\Delta \tau$ изменение температуры вдоль осей будет:

$$\Delta t_{0X}^+ = t_{0X}^+ - t_0 ;$$

$$\Delta t_{0X}^- = t_{0X}^- - t_0 ;$$

$$\Delta t_{0Y}^+ = t_{0Y}^+ - t_0 ;$$

$$\Delta t_{0Y}^- = t_{0Y}^- - t_0 ;$$

$$\Delta t_{0Z}^+ = t_{0Z}^+ - t_0 ;$$

$$\Delta t_{0Z}^- = t_{0Z}^- - t_0 ;$$

$$\Delta t_0 = (\Delta t_{0X}^+ + \Delta t_{0X}^-) + (\Delta t_{0Y}^+ + \Delta t_{0Y}^-) + (\Delta t_{0Z}^+ + \Delta t_{0Z}^-) + \Delta t_{0q} ,$$

где Δt_{0q} - изменение температуры за счет удельного тепловыделения q . Если в ячейке $q = 0$, то в уравнении оно отсутствует.

*Разработка алгоритма расчета температурного поля
численным методом*

Методика расчета температурного поля, описанная выше, реализуется алгоритмом, блок-схема которого приведена в Приложении 1.

Программа, реализующая данный алгоритм и написанная на языке Turbo Pascal приведена в Приложении 2.

Расчет температурного поля РЭС является трехмерной задачей, поэтому и массивы температур, мощностей тепловыделения, всех теплофизических параметров и т. д. должны быть трехмерными. Элементы нумеруются снизу вверх, слева направо, от ближнего к дальнему, как изображено на рис. 5.9.

Подготовка исходных данных

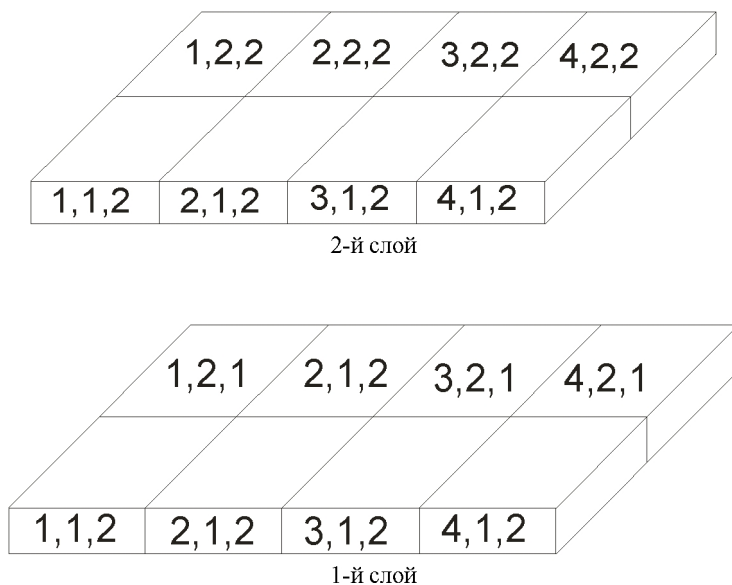


Рис. 5.9. Нумерация элементов в разбиении

Для расчета температурного поля объекта исследования, выполненного с помощью цифрового моделирования, потребуются следующие данные:

- длина, ширина, и высота конструкции, мм;
- число слоев разбиения по длине, ширине и высоте;
- количество источников тепла;
- координаты источников тепла x_i, y_i, z_i
- мощности источников тепла, Вт.

Если в один кубик попало сразу несколько источников, то они принимаются за один источник с мощностью, равной суммарной мощности.

Координаты кубика определяются x_i, y_i, z_i - номерами слоев, перпендикулярными соответственно длине, ширине, высоте, т.е. должны быть не в метрах, а в номерах слоев разбиения.

Работа с программой

Для запуска программы необходимо включить персональный компьютер с соответствующим программным обеспечением и запустить файл: * Tempres.exe.

Максимальное число слоев разбиения 8x8x8, максимальное число материалов в одном кубике -10.

Наиболее часто применяемые материалы приведены в Приложении 3.

Заметим, что в литературе обычно приводятся значения теплоемкости, поэтому, чтобы получить необходимую размерность, надо табличное значение умножить на плотность этого вещества.

6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОНТАЖ РЭС

6.1 Внутри- и межблочный монтаж

Внутри- и межблочный монтаж РЭС выполняется жгутами, проводами, плоскими кабелями и различными типами линий связи. Выбор типа монтажа зависит, в основном, от требований конструкции, от вида РЭС. Основные факторы при выборе монтажа - минимальная его длина, технологичность, надежность и помехоустойчивость.

Жгутовый монтаж РЭС состоит из следующих характерных этапов: подготовки радиодеталей; заготовки монтажных проводов, кабелей и жгутов; электрического монтажа аппаратуры; пайки монтажных соединений; сварки монтажных соединений.

Подготовка радиодеталей к монтажу и заготовка монтажных проводов и жгутов. Навесные детали (конденсаторы, резисторы, полупроводниковые приборы) перед монтажом проходят подготовку, во время которой выпрямляют, подрезают, лудят и изгибают выводы.

Обычно длину выводов выбирают с таким расчетом, чтобы после их закрепления на контактных лепестках расстояние между местом крепления (пайки) и корпусом радиодетали было бы минимальным, но не менее 8... 10 мм (если нет специальных указаний в технологической карте).

Подготовка навесных деталей ведется с применением специальных приспособлений и установок, позволяющих механизировать и автоматизировать эти операции.

Заготовку монтажных проводов начинают с правки (выравнивания) провода, поступающего на завод в бухтах. После этого провод разрезают на заготовки необходимой длины, указанной в технической документации.

При монтажных работах сращивание проводов из отдельных отрезков не допускается. Марку провода, его сечение и расцветку также определяют по технической документации.

Способ заготовки монтажных проводов зависит главным образом от масштаба производства.

В серийном производстве для мерной резки проводов применяют приспособления и станки, значительно повышающие производительность труда и точность этой операции.

После резки монтажные провода и кабели поступают на заделку концов, которая состоит из следующих операций: зачистки концов от изоляции и экранирующей оплетки, удаления окисной пленки, скручивания жил, лужения и закрепления концов изоляции.

Способ заделки концов зависит от ряда факторов: марки применяемого провода или кабеля, конструктивных особенностей монтажа и его деталей, условий эксплуатации радиоаппаратуры, а также от масштаба производства.

Зачистка провода от изоляции должна проводиться на такую длину, которая бы обеспечивала надежность закрепления жил на контактных лепестках без излишних технологических отходов. Обычно это 7...10 мм. Изоляция удаляется с проводов различными способами:

а) с проводов МГВ, МГВЛ, МГВСЛ, БПТ-20, ТМ-250, ПВМ, ПМОВ (с внутренней изоляцией из стекловолокна), БПВЛ, МЦСЛ - способом надреза на автомате;

б) с проводов МГВ, МГВЛ, БПВЛ, ПВЛ, ПМВ, ПМОВ (с внутренней изоляцией из хлопчатобумажного волокна), ПМВГ, МГШВ, МГЛ, МОГ - способом электрообжига на автомате одновременно с мерной резкой заготовок или электрообжигом изоляции на специальном приспособлении, устанавливаемом на столе монтажника;

в) с одиночных проводов МГВ, МГВЛ, МГВСЛ, БПВЛ, БПТ-250, ПВЛ, ПМВ, ПМОВ (с внутренней изоляцией из стекловолокна), МЦСЛ, ЛПЛ, МОГ, ТМ-250 - специальными щипцами.

Эмалевую изоляцию удаляют: с проводов ПЭТ, ПЭЛ - шлифовальной шкуркой, шабером и пр.; с проводов ПЭВ и ПЭМ - опуская концы провода в муравьиную кислоту, затем протирая мягкой тряпкой; с многожильных проводов ЛЭШО и ЛЭШД - нагревая в верхней части пламени спиртовой горелки распущенный конец провода до светло-соломенного свечения и быстро погружая в спирт крепостью не менее 94°, а затем протирая мягкой тряпкой.

Кроме рассмотренных способов для удаления эмалевой изоляции применяют нагревательные и механические приспособления.

Нагревательное приспособление представляет собой фарфоровую трубку, на которую намотана нагревательная спираль. Трубка закреплена на деревянной ручке. Питание осуществляется через понижающий трансформатор. Для удаления изоляции концы провода вводят внутрь фарфоровой нагретой трубки, где эмаль сгорает.

К механическим приспособлениям, предназначенным для удаления эмалевой изоляции, относится устройство с металлическими щетками, которые вращаются при помощи электродвигателя в противоположных направлениях. Изоляция снимается за несколько секунд. Станок с вращающимися металлическими щетками может быть использован для снятия любой изоляции, включая резиновую и стекловолокнистую.

Настройка полуавтомата на определенную длину оклетневки при различных номерах ниток производится сменой кулачка и зубчатого колеса. Хорошим способом заделки хлопчатобумажной изоляции на концах провода является заделка с помощью хлорвиниловых, резиновых или линоксиновых трубок (рис. 6.1а).

Заделку нитролаком выполняют на участке провода длиной 8...10 мм (рис. 6.1б).

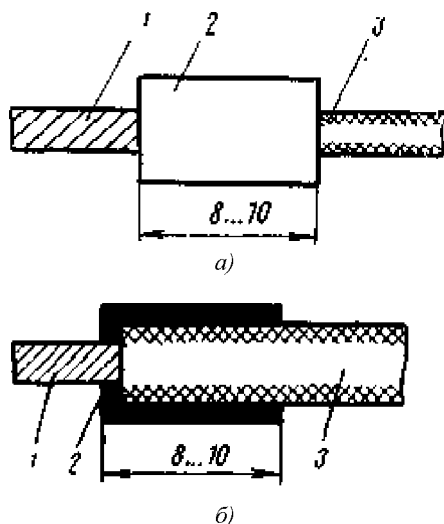


Рис. 6.1. Закрепление изоляции провода: а - отрезком трубки; б - нитролаком: 1 - жила; 2 - нитролак; 3 - изоляция

При закреплении концов оплетки проводов БПВЛ, МГВЛ и МГВСЛ нитролаком или оклетневкой оплетку предварительно сдвигают на 3...5 мм от места среза полихлорвиниловой изоляции, а избыток ее разгоняют вдоль провода.

При удалении изоляции с проводов БПВЛ и МГВЛ электрообжигом концы оплетки спекаются с внутренней изоляцией, поэтому закреплять их не нужно.

Текстильную изоляцию провода ПВЛ снимают на участке длиной 8...10 мм от места среза резиновой изоляции. Изоляцию с экранированных проводов снимают ступенями (рис. 6.2). Размеры со звездочкой, устанавливают в зависимости от рабочего напряжения провода (табл. 6.1).

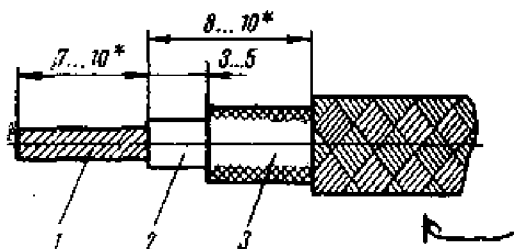


Рис. 6.2. Разделка конца провода БПВЛЭ (БПШЭ, МГВЛЭ, МЦСЛЭ):

1 - жила; 2 - пластиковая изоляция; 3 - текстильная оплетка

**Таблица 6.1 Зависимость расстояния между жилой
и оплеткой провода от рабочего напряжения**

Напряжение, В, до	127	220	380	500
Наименьшее допустимое расстояние, мм ...	3	5	7	9

Заделку концов экранирующей оплетки выполняют несколькими способами:

- 1) протаскиванием конца провода через отверстие, сделанное в оплетке, и подключением свободного конца оплетки к корпусному лепестку;
- 2) подпайкой к оплетке дополнительного провода;
- 3) намоткой на оплетку голого луженого провода и последующей пропайкой этого места;
- 4) закреплением экранирующей и текстильной оплеток нитками с последующим покрытием нитроклеем и припайкой к середине провода МГВ (этот способ применяется для коротких проводов). Обычно монтажные провода, прокладываемые в одном направлении, увязывают в общий жгут хлопчатобумажными или льняными нитками. Жгутовый монтаж отличается повышенной механической прочностью, уменьшает разброс собственной емкости схемы, снижает трудоемкость монтажных операций.

Электрический монтаж аппаратуры. Электрический монтаж состоит в укладке проводов, жгутов и кабелей на шасси прибора, механическом закреплении жил проводов и выводов навесных радиодеталей на контактах и контактных лепестках и последующей пайке или сварке мест соединений.

Принят следующий порядок выполнения монтажа:

- 1) монтаж расшивочных панелей, переключателей и других обособленных узлов (до их установки на шасси);
- 2) монтаж перемычек из голого провода;
- 3) установка одиночных проводов;
- 4) установка на шасси предварительно смонтированных узлов и монтаж проводов, идущих от этих узлов;
- 5) укладка жгута на шасси и монтаж его проводов;
- 6) монтаж навесных радиодеталей (резисторов, конденсаторов).

Монтаж необходимо выполнять в строгом соответствии с предъявленными техническими требованиями.

Детали и узлы, поступающие на монтаж, должны иметь обслуженные контактные лепестки и выводы. Луженая поверхность должна быть чистой, глянцевой, ровной, без потеков припоя. Обычно лепестки и выводы предварительно лудят припоями ПОС-40 и ПОС-61. Слой полуды должен быть сплош-

ным, одинаковой толщины, не более 50...70 мкм. Лепестки и выводы обрабатывают двумя способами: горячим лужением (погружением в расплавленный припой) и гальваническим лужением в электролитических ваннах. Исследование спаиваемости монтажных лепестков, луженных различными способами, показало, что лучшие результаты дает гальваническое лужение припоем ПОС-61.

Непосредственно перед пайкой припой на контактных лепестках и выводах оплавляют, окуная их в нагретое до температуры 250...270°C касторовое или трансформаторное масло или в глицерин.

Укладку проводов и жгутов проводят в строгом соответствии с монтажной схемой. Произвольное размещение монтажных проводов или отступления от монтажной схемы могут привести к значительным отклонениям значений выходных параметров радиоаппаратуры (чувствительности, полосы пропускания и др.) от заданных.

Нельзя укладывать провода с винилитовой изоляцией на острые металлические кромки. Длинные монтажные провода и жгуты закрепляют на шасси специальными скобами, чтобы избежать изменения расстояния между проводниками в условиях эксплуатации.

Крепление жгутов и кабелей рекомендуется производить на участках длиной более 150 мм. Нельзя применять провода с поврежденной или восстановленной изоляцией. Подключение проводов жгута к контактным лепесткам выполняют в соответствии с маркировкой, расцветкой и длиной их концов. Если сомневаются в правильности соединения, провода проверяют при помощи пробника.

Механическое крепление жил проводов и выводов навесных деталей на контактах и контактных лепестках выполняют, чтобы повысить прочность соединения.

В зависимости от требований, предъявляемых к прочности монтажа, применяют различные способы крепления проводников на контактных лепестках. Обычно концы монтажных проводов продевают в отверстие лепестка (контакта) и загибают. Если же аппаратура предназначена для работы в условиях тряски и вибрации, концы проводов отгибают вокруг лепестков на 1...2 оборота и обжимают.

Нельзя паять незакрепленные концы (встык и внахлестку). Только в виде исключения в процессе настройки разрешается подпайка выводов радиодеталей без механического закрепления. Такие детали на схеме помечают звездочками. Окончив настройку, делают обязательную пайку с механическим закреплением.

Обычно к одному контактному лепестку подключают не более трех токопроводящих жил и лишь в исключительных случаях до пяти. При этом каждую из них в отдельности навивают на лепесток и обжимают. Расстояние от

места закрепления жилы до среза изоляции монтажного провода не должно превышать 1... 1,5 мм.

Проводники не должны быть натянуты, это предохраняет монтаж от разрушения при вибрации и облегчает замену радиодеталей, вышедших из строя. Навесные радиодетали располагают друг от друга, а также от шасси и токопроводящих поверхностей не менее чем на 2 мм.

Монтаж полупроводниковых приборов проводят с соблюдением следующих правил:

а) тщательно следят за правильностью подключения, полярностью выводов (первым подключается базовый вывод триода);

б) выводы закрепляют осторожно, чтобы не согнуть их в местах выхода из корпуса;

в) расстояние от места крепления выводов до корпуса должно соответствовать техническим условиям.

На рис. 6.3 показана заделка провода в кабельный наконечник.

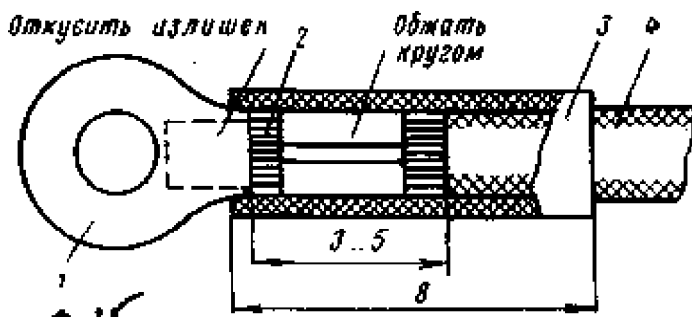


Рис. 6.3. Заделка провода в кабельный наконечник:

1 - наконечник; 2 - жила; 3 - изоляционная трубка; 4 - изоляция

Облуженный конец жилы вставляют в зажимную часть, а затем плотно обжимают специальными щипцами и удаляют излишки жилы. После пайки на наконечник надвигают полихлорвиниловую трубку.

Пайка монтажных соединений. Пайка монтажных соединений необходима для обеспечения механически прочного и надежного электрического контакта; выполняют ее мягкими оловянно-свинцовыми припоями.

Механическая прочность правильно выполненных паяных швов всегда бывает выше прочности самих припоев и обеспечивается, прежде всего, выбором оптимального зазора между спаиваемыми деталями. Зазор должен быть по возможности малым, чтобы его заполнил сплав припоя с основным металлом, но с другой стороны, слишком малый зазор затрудняет проникновение припоя и приводит к образованию пустот в шве, которые снижают его проч-

ность, электропроводность, герметичность и т. д. Оптимальная величина зазора, соответствующая наибольшей механической прочности паяного шва для оловянно-свинцовых припоев, составляет 70...80 мкм.

Кроме выбора оптимального зазора для обеспечения качественной пайки необходимо, чтобы поверхность деталей была чистая, без окислов и загрязнений, чего добиваются, применяя флюсы, которые, во-первых, очищают поверхности соединяемых деталей от загрязнений и растворяют окисные пленки и, во-вторых, предохраняют поверхность от окисления в процессе пайки.

При монтаже аппаратуры нельзя применять в качестве флюса хлористый цинк, так как он, будучи растворенным в воде, содержит свободные пары соляной кислоты, которая разрушает жилы проводов и изоляцию.

Основным флюсом, применяемым при монтаже радиоаппаратуры, является канифольно-спиртовой флюс (30%-ный раствор канифоли в спирте). Кроме раствора канифоли, применяют и кусковую канифоль. Она растворяет окислы меди при температуре выше 150°C и не вызывает разрушения проводов и деталей.

При пайке стальных корпусных лепестков с гальваническим покрытием (никель, цинк и др.) применяют флюс ЛТИ-120, представляющий собой спиртовой раствор триэтанолamina и канифоли с активными добавками.

Перед нанесением флюса на соединяемые детали производят механическую очистку поверхности, которую желательно сделать шероховатой, с сетью капиллярных канавок. Эти канавки увеличивают смачивание основного металла припоем.

Оловянно-свинцовые припои, применяемые для пайки монтажных соединений, представляют собой сплавы олова и свинца. Чистое олово при пайке не применяется из-за явления «оловянной чумы», наблюдающегося при длительном воздействии температуры ниже 5°C (олово рассыпается, образуя серый порошок), а также из-за хрупкости соединений и дефицитности олова. Кроме того, жидкотекучесть чистого олова ниже, чем сплава, что весьма важно для получения качественной пайки.

Основными припоями, имеющими широкое распространение при монтаже аппаратуры, являются припой ПОС-40 и ПОС-61 с содержанием соответственно 40 и 61% олова.

Припой ПОС-40 применяют для лужения токопроводящих жил проводов, кабелей РК, кабельных наконечников, контактных лепестков, а также для пайки большинства монтажных соединений, допускающих нагрев до 280° С.

Припой ПОС-61 применяют для лужения и пайки изделий, допускающих нагрев не выше 230° С. В тех случаях, когда аппаратура работает при температурах, превышающих температуру плавления припоев ПОС, применяют припой ПСР-2,5, который содержит 2,5% серебра, 5,5% олова, 92% свинца. Температура кристаллизации припоя 305° С.

При пайке деталей из стали, оцинкованного железа, белой жести, меди и медных сплавов используют главным образом припой ПОС-18 и ПОС-30. Повышения механической прочности припоев достигают, вводя в их состав сурьму (до 1,5...2,5%).

В практике монтажа находят применение и легкоплавкие припои ПОК-56 и ПОСВ-33, которые содержат, кроме олова и свинца, висмут и кадмий. Эти припои применяют для пайки при пониженной температуре; температура их плавления лежит в пределах 60...180° С.

Припой ПОК-56 (олова 56% и кадмия 44%) используют для лужения и пайки соединений, допускающих нагрев не выше 140°С, например, при пайке жил и экранов высокочастотных кабелей, выводов полупроводниковых приборов и для соединений вблизи ранее сделанных паек.

Припой ПОСВ-33 (олова 33,4%, свинца 33,3% и висмута 33,3%) применяют для лужения и пайки изделий, допускающих нагрев не выше 140...150° С.

При пайке проводов с арматурой стеклянных изоляторов применяют легкоплавкий припой ПОСК-50. Для улучшения качества пайки и повышения производительности труда рекомендуется применять трубчатый припой с канифольным наполнителем. Формы сечения трубчатых припоев показаны на рис. 6.4. Припой представляет собой трубку из оловянно-свинцового сплава, внутри которой помещен канифольный флюс. Такой конструкции свойственны некоторые недостатки, заключающиеся в преждевременном вытекании и испарении флюса, возможных перерывах и подаче флюса к месту пайки.

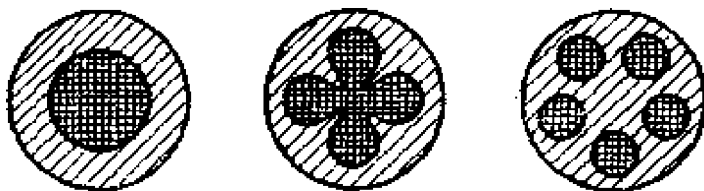


Рис. 6.4. Формы сечения трубчатых припоев

Измененная форма сердцевины значительно уменьшает вероятность образования пустот в трубчатом припое и перерывов в подаче флюса.

Качество пайки монтажных соединений определяется: правильностью заточки жала паяльника, температурным режимом паяльника, количеством флюса и припоя, прогревом места пайки, временем пайки, правильным применением теплоотвода и т. п.

Наиболее удобной формой жала паяльника считается четырехгранная с заостренными углами 20...30° и 10...20° (рис. 6.5). Поверхность жала должна быть ровной, без раковин, очищенной от нагара и хорошо облуженной.

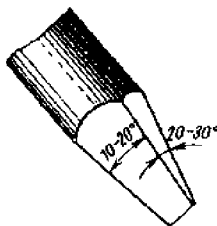


Рис. 6.5. Заостренный конец жала паяльника

Температуру нагрева паяльника выбирают такой, при которой припой быстро плавится, но не стекает с рабочей части (жала), а канифоль не сгорает мгновенно, а остается на жале в виде кипящих капелек. Температуру нагрева паяльника, в зависимости от марки припоя, можно выбрать по табл. 6 2.

Т а б л и ц а 6.2. Температура нагрева паяльника в зависимости от марки припоя

Марка припоя	Температура плавления припоя, °С	Температура нагрева паяльника, °С
ПОС-40	235	280...300
ПОС-61	183	230...250
ПОСВ-33	130	150...170
ПОСК-50	145	170...190

Припой представляет собой трубку из оловянно-свинцового сплава, внутри которой помещен канифольный флюс. Такой конструкции свойственны некоторые недостатки, заключающиеся в преждевременном вытекании и испарении флюса, возможных перерывах и подаче флюса к месту пайки.

Длительность пайки не должна превышать 4...5 сек.

Перегрев при пайке весьма опасен для конденсаторов КБГ и КСГ, так как он может вызвать выплавление или растрескивание проходных изоляторов; в конденсаторах КСО - размягчение или растрескивание пластмассы.

Перегрев при пайке вызывает изменение параметров резисторов и конденсаторов. Эти изменения могут достичь больших значений; например, при пайке непроволочных резисторов возможные отклонения от номинальных значений достигают 20%. Поэтому необходимо соблюдать определенные расстояния между местом пайки и корпусом детали. Эти расстояния должны быть не меньше 8 мм для резисторов ВС, германиевых диодов ДГД, конденсаторов КСО, КТК, КДК и 5...8 мм для резисторов С2-23. Качество паяных монтажных соединений во многом зависит от правильного применения теплоотвода. Теплоотвод представляет собой пинцет с медными насадками на губах. Пайку с теплоотводом применяют, когда расстояние от корпуса детали (резистора и конденсатора) до места пайки меньше 8 мм, когда провода заключены в полихлорвиниловые трубки, когда расстояние от корпуса полупро-

водникового прибора до места пайки меньше 10 мм, а температура плавления припоя превышает 150°С и, наконец, при пайке на контактных лепестках, расположенных на стеклянных изоляторах.

Для пайки монтажных соединений применяют электрические паяльники с нагревательным элементом в виде спирали из нихромовой проволоки.

Требуемую мощность паяльника выбирают в зависимости от массы и марки материала соединяемых деталей. При монтаже радиоэлектронной аппаратуры применяют паяльники мощностью 50; 75; 120 Вт с питанием от сети переменного тока напряжением не более 36 В. Паяльники на 75 и 120 Вт используют для пайки соединений со значительной массой металла (провода большого сечения, кабельные наконечники, корпусные лепестки и др.).

По конструкции электрические паяльники бывают трех типов: молотковые, торцовые и Г-образные. Паяльники этих типов имеют существенные недостатки: большую потерю времени на разогрев жала, окисление жала, так как оно постоянно нагрето, непроизводительный расход электроэнергии.

От этих недостатков свободен импульсный паяльник, жало которого представляет собой U-образный медный провод, который одновременно служит нагревательным элементом. Медный провод соединен со вторичной обмоткой понижающего трансформатора.

Трансформатор питается от сети напряжением 220, 127 и 36 В. Лампочка, включенная в дополнительную обмотку III трансформатора, сигнализирует о включении паяльника.

Конструктивно паяльник оформлен в виде пистолета, в кожухе которого находится трансформатор. При нажатии на курок включается в сеть первичная обмотка трансформатора, при этом во вторичной обмотке индуцируется ток низкого напряжения в несколько сот ампер. За 3...4 с паяльник нагревается до необходимой температуры. Масса паяльника 700 г, потребляемая мощность 135 Вт.

Самый опасный дефект - пропуск паяк. Пропуск паяк опасен тем, что прибор с механически закрепленным, но незапаянным проводником проходит весь цикл регулировок и проверок. Незапаянный контакт и проводник покрываются окисной пленкой, в этом узле резко возрастает переходное сопротивление или совершенно обрывается цепь, что приводит к отказу аппаратуры.

Одна из последних операций монтажа - очистка прибора от остатков монтажных материалов и пыли; прибор продувают сжатым воздухом в специально отведенном для этого помещении.

Законченный монтаж передают на технический контроль.

Хотя пайка оловянно-свинцовыми припоями и является основным способом соединений монтажа и широко распространена, она имеет ряд существенных недостатков, основные из которых сводятся к следующему:

а) сравнительно небольшой температурный интервал (от 60 до +130° С);

б) низкая механическая прочность паяного соединения, выполненного легкоплавкими припоями;

в) высокая стоимость припоев и флюсов;

г) трудность механизации и автоматизации процесса.

Замена пайки электродуговой сваркой позволяет устранить указанные недостатки паяных соединений.

Сварка монтажных соединений. Сварное соединение характеризуется повышенной механической прочностью, малым электрическим сопротивлением, а также надежностью при тепловых перегрузках. Кроме того, сварка дает следующие преимущества:

а) отпадает необходимость производить лужение или серебрение поверхностей соединяемых деталей;

б) отсутствуют затраты на припой и флюсы;

в) отсутствуют вредные испарения, характерные при пайке;

г) появляется возможность соединения таких материалов, как нихром, константан, фехраль, не поддающихся пайке.

Однако замена пайки сваркой приводит к необходимости изменения конструкции монтажных деталей радиоаппаратуры. Эти изменения касаются главным образом лепестков и определяются технологическими требованиями.

При сварке удобно применять лепестки в виде полутрубочки с отверстием сбоку (рис. 6.6а).

Проводник вставляют через боковое отверстие лепестка так, чтобы конец выступал на 5...6 мм. Затем полутрубочку обжимают в трубочку (рис. 6.6б) и сваривают (рис. 6.6в). Для отвода тепла и предупреждения перегрева монтажных соединений при электросварке применяют термоэкран. Процесс электросварки монтажных соединений может быть механизирован и даже автоматизирован.

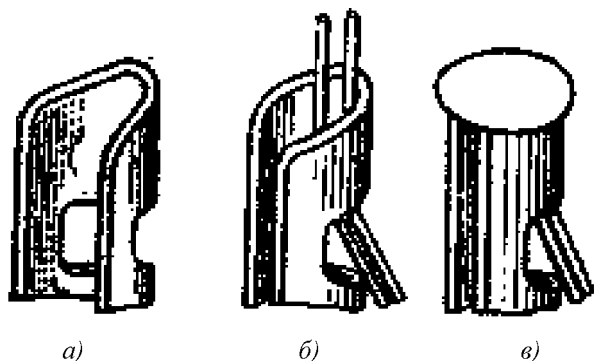


Рис. 6.6. Последовательность выполнения сварного соединения

Качество сварных соединений, полученных электросваркой, контролируют обычными методами, применяемыми для паяных соединений, причем особое внимание обращают на соединение нескольких проводников и выводов, особенно из различных материалов. После контроля сварные соединения окрашивают лаком или краской, чтобы предохранить их от коррозии.

Печатный монтаж радиоэлектронной аппаратуры. Изготовление радиоэлектронной аппаратуры с применением печатных плат можно разбить на ряд этапов: печатание электрического монтажа; подготовка радиоэлементов к монтажу; установка радиоэлементов на печатной плате; пайка; контроль.

Печатным монтажом называется система печатных проводников, обеспечивающих электрические соединения элементов схемы, экранирование, заземление.

Печатание электрического монтажа заключается в создании тем или иным способом токопроводящих покрытий (проводников) на изоляционном основании (плате), проводники представляют собой узкие и тонкие полоски металла, выполняющие функции монтажных проводов. Печатные проводники могут быть расположены с обеих сторон изоляционного основания.

Конденсаторы, резисторы, полупроводниковые приборы и другие детали и элементы схемы закрепляют в определенных точках в отверстиях печатных проводников, а затем припаивают к ним. Применительно к технике печатного монтажа такие детали и элементы получили название навесных.

Печатная плата представляет собой изоляционное основание с выполненным на нем печатным монтажом (рис. 6.7).

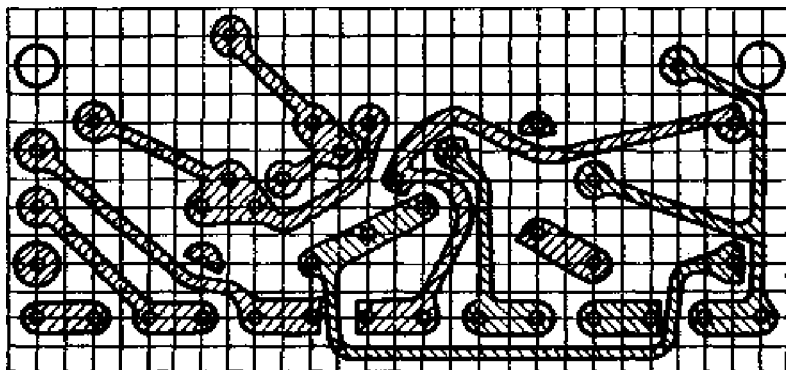


Рис. 6.7. Печатная плата

Применение печатного монтажа повышает надежность аппаратуры, обеспечивает однообразие в монтаже, исключает ошибки монтажа и уменьшает габариты, резко снижает трудоемкость монтажно-сборочных работ и создает условия для механизации и автоматизации производства.

Радиоаппаратура с монтажом, выполненным печатным способом, отличается стабильностью электрических и радиотехнических параметров, а также высокой механической прочностью, поскольку все детали прочно связаны с изоляционной платой.

Изоляционные основания печатных плат изготавливают из электротехнического гетинакса, фольгированного гетинакса, фольгированного стеклотекстолита и др. (табл. 6.3). Для предохранения печатного монтажа от воздействия влаги, а также с целью электроизоляции схем применяют различные лаки и компаунды.

Т а б л и ц а 6.3. М а т е р и а л ы п л а т

Методы изготовления печатных плат	Марки материалов	ГОСТ или ТУ	Реком. толщины матер., мм
Химический	Гетинакс фольгированный ГФ - 1 - П ГФ - 2 - П	ГОСТ 10316 - 62 МРТУ 16-509-001-64	1,5-3,0
	Стеклотекстолит фольгированный СФ-1	ГОСТ 10316 - 62 МРТУ 16-509-001-64	0,8 - 3,0
	Низкочастотный фольгированный диэлектрик НФД- 180-1 НФД- 180-2	ИЖ-44-65	1 ,5 - 3,0
Электрохимический	Гетинакс электротехнический «ЭВ»	СТУ-36- 14-04 - 62	1,5 - 3,0
	Гетинакс электротехнический «ВВ»	ГОСТ 2718 - 54	1,5-3,0
Комбинированный	Гетинакс фольгированный ГФ-1-П ГФ-2-П	ГОСТ 10316 - 62 МРТУ 16-509-001 - 64	1,5-2,5
	Стеклотекстолит фольгированный СФ-1	ГОСТ 10316 - 62 МРТУ	0,8-2,5

Существуют разнообразные методы изготовления печатных плат, отличающиеся друг от друга способом создания проводящего покрытия.

Получившие наибольшее применение в промышленности методы изготовления печатных плат могут быть объединены по технологическим признакам в три основные группы.

Г р у п п а - получение печатных проводников осаждением электролитической меди на изоляционное основание. Для этого используют следующие методы:

фотоэлектрохимический; офсетно-электрохимический; сеточно-электрохимический; прессоэлектрохимический.

П г р у п п а - получение печатных проводников травлением фольгированного изоляционного материала. Для этого используют следующие методы: фотохимический; офсетно-химический; сеточно-химический

Ш г р у п п а - получение печатных проводников переносом их со стальной матрицы на изоляционное основание. Для этого используют следующие методы: фотоперенос; офсетоперенос; сеточный перенос.

При проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию новых изделий электронных средств правильность технических решений оперативно проверяют на макетах или опытных образцах изделия. В этих случаях непригодны технологические процессы серийного и массового производства плат на основе фольгированных слоистых материалов (ФСМ). Поэтому для изготовления макетов используют печатные платы единичного производства: макетные, изготовленные методами механического или лазерного фрезерования, и рельефные.

6.2. Перспективы развития электрических соединений

Монтаж на поверхность и пластиковые оптические волокна будут оказывать влияние на будущие разработки ЭС. Достижения в области полупроводниковой технологии, несомненно, станут движущей силой для всех важных разработок в области технологии электрических соединений на всех иерархических уровнях изделий. На уровне приборов, например, уже сейчас имеется многокристальный модуль с небольшими и плотно расположенными межсоединениями между кристаллами, играющими основную роль в изделиях.

На уровне соединений между платами по-прежнему будут использоваться объединительные панели. Однако многоштыревые соединители не могут теперь быть просто штырьками в пластмассовом корпусе. Для реализации межсоединений быстродействующих логических плат нужно использовать методы теории передающих линий. Соединители будут выполняться в виде симметричных и несимметричных полосковых линий передачи и коаксиальных структур, рассчитанных на ускорение передачи сигналов и снижение уровня шумов. Нынешние корпуса с матрицей выводов - самое эффективное средство для передачи сигналов, подвода питания и обеспечения заземления в системе.

Место медного кабеля (монтажных жгутов), используемого сейчас для межсоединений, займёт недорогой пластмассовый оптический кабель. Правда, сейчас трудно рассчитывать на использование оптического волокна для коротких линий в быстродействующих изделиях. Одной из причин этого является задержка при переходе между оптической и электрической средами передачи. Если рассматривать только задержку на прохождение сигнала, то чисто медная система межсоединений может на деле оказаться более быстро-

действующей, чем оптическая, несмотря на то, что оптическая среда способна дать значительно более широкую полосу.

Соединители в конструкции ЭС. Правильное конструктивное решение при сборке печатных плат в единый узел позволяет оптимизировать конструкцию разрабатываемых ЭС.

Имеются три основных типа соединителей: краевой, розеточно-штыревой и с нулевым усилием сочленения. При выборе типа соединителя следует учитывать конфигурацию шин, требования техническим характеристикам ЭС. Кроме того, должны быть приняты во внимание следующие факторы:

- усилие, требующееся для установки или извлечения соединителя с силовым сопряжением, которое накладывает ограничения на размер последнего;
- величина шага размещения контактов соединителя, которая определяет возможное число контактов на единицу площади;
- метод монтажа, который может представлять собой либо пайку, либо запрессовку контактов. В последнем случае использование деформируемых контактных штырьков позволяет получить надежное герметичное соединение.

Никакая конфигурация шин и никакой тип соединителя не являются универсальными для всех применений. Усложнение ЭС, рост плотности монтажа, расширение областей применения ставят конструкторов перед необходимостью тщательно взвешивать достоинства и недостатки существующих методов сборки. Неправильный выбор может ограничить возможности ЭС или сделать проектируемые ЭС несовместимыми с существующими.

В настоящее время для монтажа СБИС на схемных платах разрабатывается множество разнообразных гнезд и соединителей, применение которых позволяет избежать риска распайки дорогостоящих СБИС в корпусах с числом выводов 100 и более непосредственно на печатную плату.

Для электротермотренировки или отбраковки ИС, СБИС при высоких температурах разработаны специальные высокотемпературные гнезда. Для их изготовления используют новые материалы, такие как конструкционные термопласты и жидкокристаллические полимеры, чтобы свести к минимуму проблемы температурных и механических напряжений, возникающих при монтаже ИС на поверхность платы. Новые гнезда требуют несколько большей площади платы, чем непосредственная распайка ИС, однако результатом их применения должно стать повышение процента выхода годных схемных плат.

Инженеры-конструкторы и изготовители соединителей ИС имеют дело с большим количеством различных вариантов конструктивного оформления ИС, что, в свою очередь, приводит к широкому разнообразию типов гнезд ИС. Проблема рационального выбора гнезд ИС еще более усугубляется тем фактором, что ряд новейших СБИС с большим количеством выводов, также как микропроцессоры и некоторые вспомогательные микросхемы, выпускаются в шести различных вариантах корпусов - от старых и зарекомендовавших себя

пластмассовых корпусов типа DIP до сложных многослойных керамических безвыводных носителей кристаллов. Изготовители предлагают также гнезда со встроенными обходными электрическими цепочками (для улучшения частотных свойств) и соединители-адаптеры (для перехода с одного типа корпуса ИС на другой).

Соединители-адаптеры - это небольшие стеклоэпоксидные подложки, на которые можно устанавливать ТМП-детали (безвыводные носители кристалла с выводами или гнезда для этих приборов). Соединители-адаптеры сопрягаются со стандартными панелями, предназначенными для проволочного монтажа накруткой или печатной схемой платой, имеющей металлизированные контактные отверстия. Благодаря этому изготовитель может заранее установить свой нестандартный компонент в соединитель-адаптер, а затем волной припоя распаять этот адаптер в обычной схемной плате. На большинстве схемных плат, изготавливаемых по ТМП, комбинируются компоненты в корпусах для монтажа на поверхность и некоторые компоненты со штырьковыми выводами, часто с применением гнезд и соединителей печатных схемных плат. ТМП-соединитель крепится к печатной плате посредством пайки выводов и при помощи нескольких литых штифтов или винтовых фиксаторов.

До внедрения технологии поверхностного монтажа большинство гнезд и соединителей изготавливались с применением стеклотекстолитов. Однако широкое распространение ТМП потребовало, чтобы новые гнезда и соединители были в состоянии выдерживать более высокие температуры, свойственные инфракрасной пайке или пайке в паровой фазе. Это, в свою очередь, обусловило необходимость перехода на конструкционные термопластмассы, удовлетворяющие повышенным температурным требованиям ТМП.

В настоящее время разработчики гнезд и соединителей начинают применять совершенно новый материал - жидкокристаллический полимер. Этот высококачественный термопластик работает при температурах до 200°C, имеет высокий коэффициент прочности и очень малую усадку при литье. Что касается электрических характеристик, то жидкокристаллический полимер имеет малую диэлектрическую постоянную (от 2,6 до 3,3), и это делает его весьма привлекательным для изготовления высокочастотных соединителей.

Применение эластомеров, сверхминиатюрных контактов и сплавов, запоминающих свою форму, позволяет преобразовать конструкции соединений.

Эластомеры - резиноподобные материалы с замечательными упругими свойствами - используются в перспективных методах создания соединителей по-разному. Например, в соединителях типа Invision применяют эластомеры с высокой степенью удержания напряжений для того, чтобы создавать и сохранять контактные усилия и одновременно обеспечивать соответствие формы и возможность выбора зазоров. В соединителях типа Area Array Connector используют эластомер в качестве подложки, на которой располагается матри-

ца специально сформированных прямоугольных проводников. Этот соединитель предназначен для контактирования с многокристальными модулями и корпусами, имеющими матрицу контактных площадок.

Соединитель типа Invision сочетает преимущества гибких схем и эластомеров, что обеспечивает высокую плотность контактов и контролируемый импеданс при создании непаяных соединений плат с платами и многокристальными модулями. В этом типе соединений микрополоски с заданным импедансом или гибкие полосковые схемы совмещаются с контактными площадками другой гибкой схемы или схемной платы и прижимаются к ней с помощью зажима и эластомерного изолятора.

Соединители типа «металл на эластомере», состоящие из слоев металлических проводящих дорожек, чередующихся со слоями изолирующих эластомеров, позволяют получить более низкое сопротивление и более высокую разрешающую способность. Такие соединители хорошо подходят для сопряжения с безвыводными носителями кристаллов, а также для непосредственного осуществления монтажа ИС на плате. Они могут успешно использоваться для создания соединений, требующих низких сопротивлений и малых расстояний.

При конструировании соединителей для сверхвысоких частот необходимо предусматривать такие специальные меры, как экранирование, с целью уменьшения электромагнитных и высокочастотных помех - согласование линии и компенсация высокочастотных потерь.

Монтаж на поверхности плат. Достоинства новой технологии монтажа на поверхность (ТМП): увеличение плотности межсоединений, уменьшение площади платы, улучшение технологических характеристик и снижение стоимости изготовления - позволяют надеяться, что ТМП станет в перспективе преобладающим методом сборки печатных узлов.

Следует напомнить, что конструкция плат, процессы установки и крепления компонентов, а также методы пайки различны в случае монтажа на поверхность и сборки обычных плат.

Существуют три различных варианта ТМП. В первом варианте компоненты припаиваются методом оплавления припоя к одной или двум сторонам печатной платы. Большинство плат, собираемых по данному принципу, - это платы с односторонним монтажом.

Наиболее популярен второй вариант, предусматривающий монтаж компонентов как на поверхность, так и в сквозные отверстия платы. При такой сборке возможны три подхода: когда на плате только с одной стороны монтируется смешанный набор компонентов обоих типов; когда с верхней стороны имеются компоненты обоих типов, а с нижней - только ТМП-компоненты; и, наконец, когда компоненты обоих типов монтируются на обеих сторонах платы.

Третий вариант - это тот случай, когда на верхней стороне платы размещаются только компоненты, монтируемые в сквозные отверстия, а на нижней - исключительно ТМП-компоненты (обычно это пассивные мини-компоненты и дискретные полупроводниковые приборы). Что же сдерживает внедрение ТМП?

Первое - это проблема надежной пайки миниатюрных корпусов с выводами или без них.

Второе - трудности, связанные с проверкой и контролем, особенно узлов с двусторонним монтажом компонентов.

Третье - необходимость очень высоких первоначальных затрат на приобретение и ввод в действие нового производственного оборудования.

Еще одна досадная проблема, возникающая при пайке оплавлением, это «вздыбливание» компонентов. Суть заключается в том, что пассивные мини-компоненты - конденсаторы, резисторы - после пайки иногда встают на торец. Это явление может быть результатом неправильной конструкции контактных площадок, неравномерных слоев припоя, а также неправильной установки мини-компонентов. Плохое состояние поверхности торцевых электродов припаиваемых концов мини-компонента, вибрация сборочного узла после нанесения полуды, низкое качество паяльной пасты и несоблюдение требуемой температуры пайки - все это также может стать причиной «вздыбливания» компонента.

В отличие от конденсационной пайки, когда нагрев осуществляется путем теплопередачи в паровой фазе, метод инфракрасной (ИК) пайки заключается в нагреве инфракрасным излучением. Типичная система ИК-пайки потребляет меньшую мощность, чем аналогичная установка для конденсационной пайки. Кроме того, при ИК-пайке для передачи тепла не требуется дорогостоящей рабочей жидкости. Благодаря предварительному нагреву в установке ИК-пайки может быть существенно снижена вероятность «вздыбливания» компонентов. Основным недостатком метода пайки ИК-излучением является неравномерность нагрева, возникающая из-за появления в сборке «горячих точек».

Рассмотрим особенности конструкций печатных плат и соединителей, используемых в ТПМ.

Для монтажа обычных соединителей в платах должны быть предусмотрены довольно большие металлизированные отверстия. ТМП -соединители, даже со сравнительно большим шагом размещения контактов - 2,5 мм, не нуждаются в таких отверстиях и, следовательно, позволяют сэкономить значительную часть площади платы. Однако истинное преимущество дают ТМП-соединители с шагом 1,25, используемые на платах с очень высокой плотностью упаковки. Создать ТМП-соединитель с малым шагом между выводами значительно проще, чем попытаться обеспечить ту же плотность упа-

ковки обычными методами. К тому же ТМП-соединители могут монтироваться на обеих сторонах платы.

ТМП-соединитель отличается от обычного соединителя не только формой контактов. Он должен также отвечать ряду специфических требований. Так, его корпус должен быть устойчив к температурным воздействиям (215°C в течение менее чем 2 мин). Это означает, что корпус ТМП-соединителя изготавливается из высокотемпературных термопластичных материалов. При выборе материала корпуса ТМП-соединителя следует учитывать также его температурный коэффициент расширения (ТКР). Слишком большая разница в ТКР платы и корпуса соединителя может привести к возникновению термических напряжений в паяных соединениях и ухудшить надежность последних.

ТМП-соединители должны иметь ориентирующие элементы, например, в виде литых выступов для точного совмещения контактов соединителя с контактными площадками платы. Кроме того, для уменьшения напряжения в паяных соединениях необходимо механическое закрепление соединителя на плате. Для фиксации соединителя можно использовать винт, защелку или даже закрепляемый нагревом выступ.

Большим преимуществом ТМП является возможность автоматизации сборки. Это означает, что конструкция ТМП-соединителя должна быть рассчитана на автоматические методы сборки, т. е. на использование автоматического манипулятора или робота. При этом важную роль играет способ упаковки соединителей при транспортировке или хранении.

ТМП остается методом, который обеспечивает самую большую компактность и самые лучшие электрические характеристики при коммутации как нынешних, так и будущих поколений быстродействующих СБИС.

Волоконно-оптические линии связи. Перспективным шагом к миниатюризации электрических соединений будет переход от гальванических соединений в блоках к оптическим волноводным линиям связи. Построение ЭС в этом случае основывается на таком разделении функций: обработка информации осуществляется, как обычно, микросхемами, а связи с микросхемами - оптическими методами. Соединения в пределах ячеек и внутриблочные соединения могут быть выполнены целиком на основе элементов интегральной оптики, а межблочные соединения - на основе многоканальных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). По мнению специалистов ВОЛС займут доминирующее положение не только в телевидении, системах связи, но и будут использованы для обмена информацией между отдельными машинами в многомашинных комплексах, вычислительных сетях, иерархических системах обработки информации. Это связано с малым поперечным сечением, малой массой ВОЛС и большей широкополосностью. Высокое качество передачи, связано с отсутствием взаимных помех между каналами, отсутствием излучения в окружающее пространство, высокой помехозащищенностью и помехо-

устойчивостью: скрытностью передачи, отсутствием коротких замыканий, искрений и угрозы возгорания, более широким температурным диапазоном работы.

Фактором, тормозящим более широкое применение ВОЛС, является их высокая стоимость.

Особенно большой эффект могут дать ВОЛС на уровне межблочных соединений и на более высоких иерархических уровнях.

Замена кабелей многослойными гибкими шлейфами повышает надежность, уменьшает массу и габариты, но не устраняет принципиального ряда недостатков, присущих гальваническим связям большой протяженности. Замена же кабелей на ВОЛС приводит к принципиально новому техническому решению - замене носителя сигнала в линии связи. Если в металлических проводах происходит движение электронов, то в стеклянных или полимерных волокнах распространяется световая волна. Это обеспечивает существенные изменения эксплуатационных и конструктивных параметров: выигрыш по массе в 50...100 раз, по габаритам - в 5...20 раз, увеличение эффективной полосы пропускания до нескольких гигагерц, высокую помехоустойчивость, высокую пропускную способность (до 500 Мбит/с и др.).

Основу ВОЛС составляет световод или оптическое волокно. Конструктивно световод состоит из сердцевины, покрытой несколькими слоями защитных материалов. Первичное покрытие - тонкая (5...10 мкм) лаковая пленка из ацетата целлюлозы, силикона, уретана или других материалов, защищающих материал сердцевины от воздействия атмосферы и увеличивающих его механическую прочность. Назначение последующих слоев - устранение воздействий на световод поперечных сил и увеличение прочности на разрыв. В целях устранения влияния усадки покрытий на материал сердцевины изготавливают трубчатый световод, располагаемый внутри полипропиленовой трубки. Группа световодов объединяется конструктивно в оптический кабель, в конструкцию которого кроме световодов включают силовые элементы, демпфирующие слои и специальные наружные покрытия. Технические предпосылки для использования ВОЛС в ЭС, имеются: уже возможно изготовление источников и приемников оптического излучения - светодиодных и фотодиодных матриц с малым шагом расположения элементов (100...500 мкм), есть микросборки оптоэлектронных преобразователей - усилителей, волоконно-оптические соединители, а также волоконно-оптические кабели, собранные из единичных оптических волокон, с полным диаметром 70...300 мкм. На рис. 6.8 приведены несколько примеров сечений оптических кабелей.

Волноводно-оптическая плата выполняет функции одного слоя коммутационной платы. Материал платы должен быть прозрачным для световых лучей, выходящих из экoplanарных ответвителей. Конструкция блока ЭС на ИМСОКС изображена на рис. 6.9.

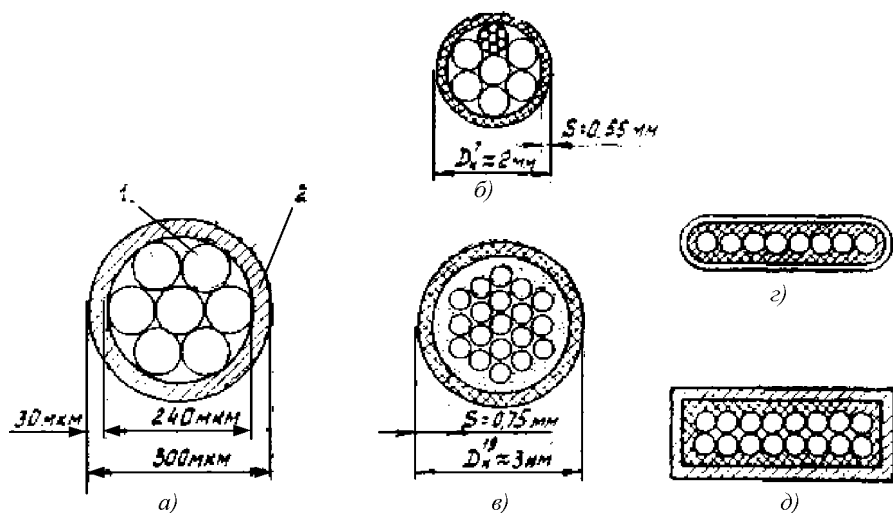


Рис. 6.8. Сечение оптических кабелей:

а - световолокнный жгут для одного канала передачи информации (1 - единичное световолокно; 2 - фиксирующая оболочка жгута); б - 7-канальный кабель с полимерной оболочкой; в - 19-канальный кабель с двухслойным полимерным покрытием; г - 8-канальный плоский однофазный кабель с полимерным и броневым покрытиями; д - 16-канальный кабель с полимерным покрытием в металлурукаве

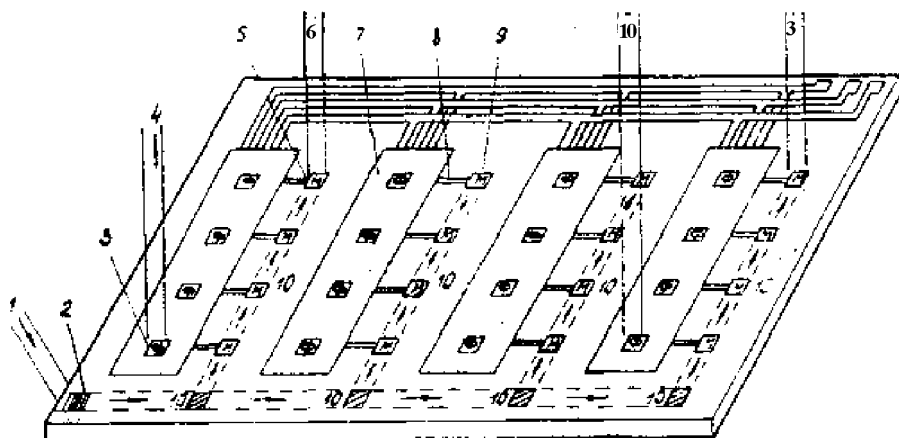


Рис. 6.9. Интегральная микросхема с оптическими каналами связи:

1 - луч светового питания; 2 - волновод; 3 - фотоприёмное окно; 4 - входной световой канал; 5 - экспланарный ответвитель; 6 - выходной световой канал; 7 - электронная часть схемы; 8 - электрические выходы; 9 - модулятор; 10 - световая разводка

Из пакета волоконно-оптических плат набираются схемные платы функциональных ячеек. Схемная оптическая плата должна состоять, по меньшей мере, из двух волноводно-оптических плат с ортогональной системой волноводов.

Основным преимуществом многослойных схемных плат по отношению к многослойным печатным платам с гальваническими связями является то, что волноводы могут пересекаться в оптически прозрачной среде, не влияя друг на друга, поскольку поступление оптических сигналов в волноводе регулируется ответвителями. Оптические связи между ИМСОКС, находящимися в различных функциональных ячейках, могут быть осуществлены либо непосредственно через волноводно-оптическую плату, либо через блочную оптическую плату.

В качестве источника излучения используются обычно светодиоды или лазерные диоды. В качестве приемников излучения (преобразователей света в электрические сигналы) используют два типа фотодиодов: с внутренним лавинным усилением - лавинный фотодиод (ЛФД) и без него. В случае необходимости передачи информации на большое расстояние во избежание потерь в ВОЛС включают регенерирующие устройства, обеспечивающие промежуточное усиление ослабленных сигналов и передачу усиленных сигналов в следующий участок ВОЛС.

Одной из основных проблем применения ВОЛС является обеспечение надежных разъемных соединений. Любые радиальные смещения, зазоры и перекосы в разъемных соединениях световодов, а также в стыках световода с источником и приемником излучения приводят к существенным потерям сигналов. Потери из-за осевого и радиального смещения и перекоса могут быть уменьшены за счет применения иммерсионных жидкостей или клея между торцами световодов, которые должны удерживаться как можно ближе друг к другу. Потери из-за рассогласования торцов световодов уменьшают за счет использования световодов большого диаметра, а также применения прецизионных юстировочных соединительных устройств.

При конструировании ВОЛС основными исходными данными являются необходимая скорость передачи информации, отношение сигнал/шум (или вероятность ошибки при передаче информации), расстояние между приемником и передатчиком информации и вид информации (цифровой или аналоговый). Кроме того, необходимо учитывать также физический и химический состав окружающей среды, стоимость, надежность, возможность модернизации, размеры, массу.

Таким образом, в ЭС оптические и волноводных линии связи могут быть использованы на многих иерархических уровнях, за исключением нулевого и уровня электронной части ИСБ, где остаются гальванические связи, которые формируются по групповой интегральной технологии.

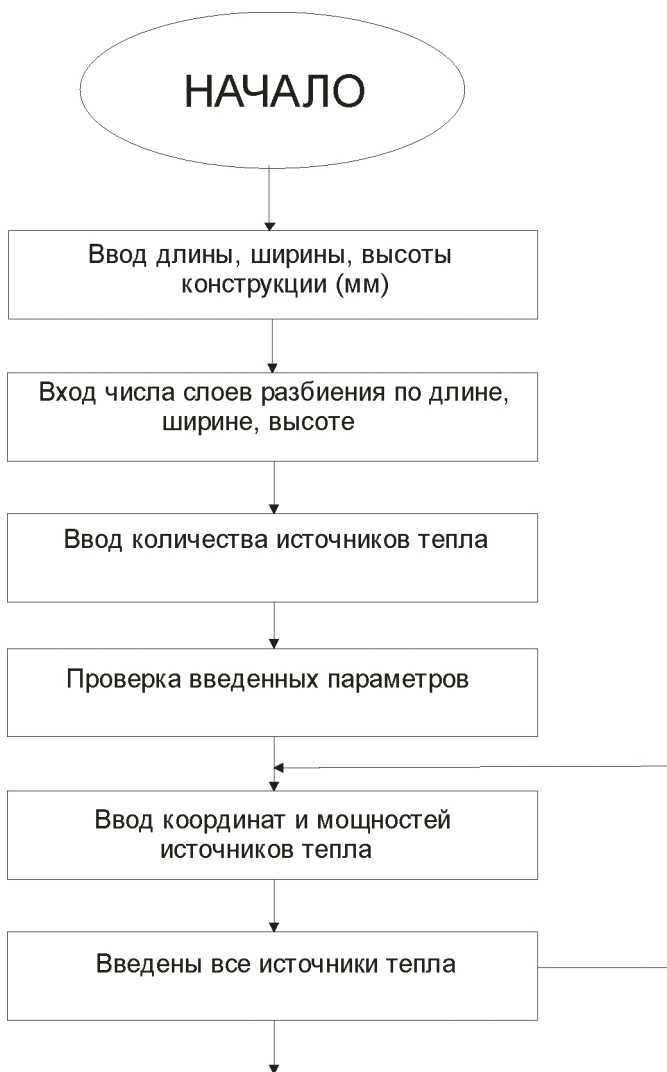
Областью применения ВОЛС могут стать автомобили. Оптический кабель значительно меньше и легче обычных монтажных жгутов, а сама оптическая среда почти не восприимчива к сильным электромагнитным и радиопомехам, возникающим в условиях автомобиля. Кроме того, оптический кабель может со временем быть полезным для реализации мультиплексного управления, при котором микропроцессор будет осуществлять временное разделение использования кабеля для осуществления разных функций в системе управления. Однако в ближайшее десятилетие в качестве эффективного в технико-экономическом отношении средства связи между небольшими отделами внутри крупных организаций все более и более привлекательным может оказаться пластмассовое волокно с его относительной простотой заделки концов и непрерывно улучшающимися техническими характеристиками.

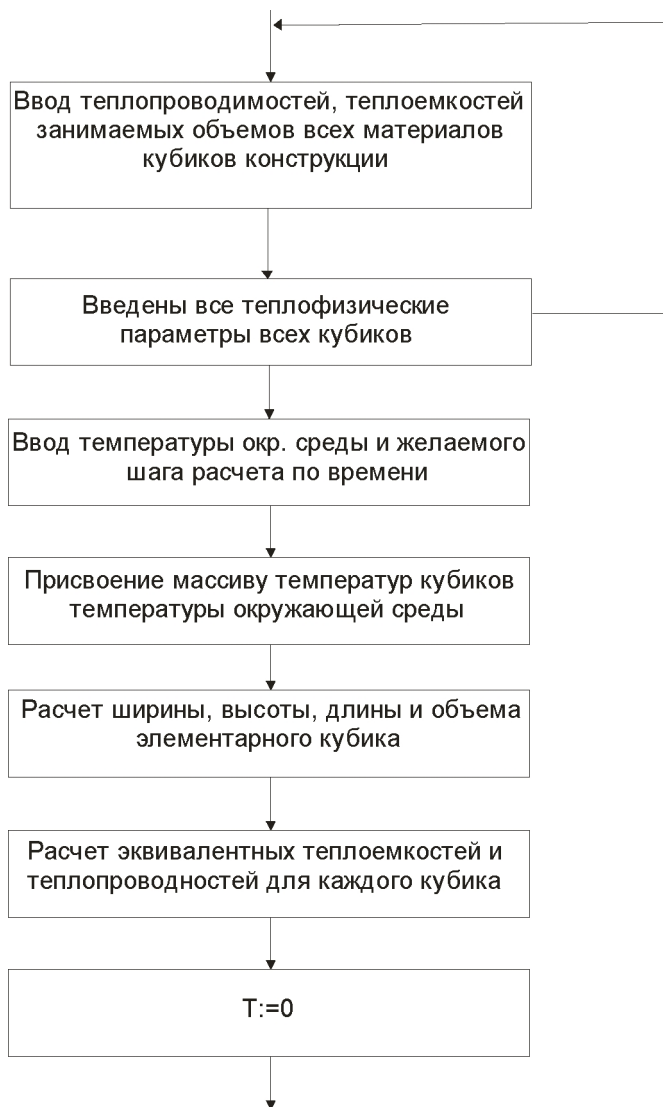
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

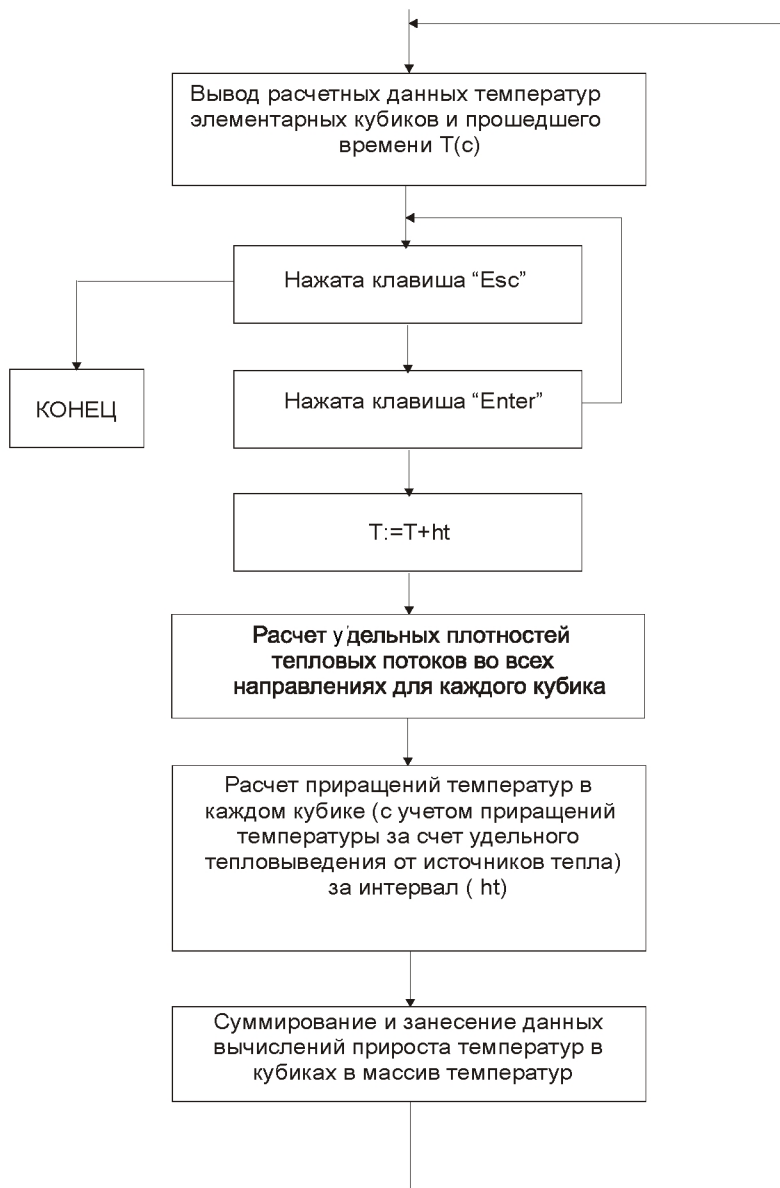
1. Зеленский, А.В. Моделирование процессов при проектировании ЭС: учеб. пособие для вузов / А.В. Зеленский, Н.В. Ляченков. - М.: Машиностроение, 2000. - 252 с.
2. Баканов, Г.Ф. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов / Г.Ф. Баканов, С.С. Соколов, В.Ю. Суходольский; 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: Изд-во 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. Покровский, Ф.Н. Материалы и компоненты радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов / Ф.Н. Покровский. - М.: Горячая линия - Телеком, 2005. - 350 с.
6. Расчет системы амортизации радиоэлектронной аппаратуры: метод. указания / сост. Г.Ф. Краснощекова. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. - 13 с.
7. Разработка конструкции радиоэлектронной аппаратуры: метод. указания к курсовому проектированию / сост. Г.Ф. Краснощекова. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. - 18 с.
8. Разработка конструкторской документации: метод. указания к лаб. и практ. занятиям / сост. А.В. Зеленский, Г.Ф. Краснощекова. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. - 28 с.
9. Анализ конструкций РЭС: метод. указания к практ. занятиям / сост. А.В. Зеленский, Г.Ф. Краснощекова. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007.
10. Колобов, А.Б. Надежность технических систем [mailto: kvk@dsn.ru](mailto:kvk@dsn.ru)

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1 . Блок-схема расчета теплового поля







Приложение 2

```
Program TEMPRES;
uses crt, dgraph;
var x,y,z:integer;
    hx,hy,hz: integer;
    nt: integer;
    archar;
    s,ss,sss:string;
    Prarray [1..8,1..8,1..6] of integer;
    C:array[1..8,1..8,1..6,110] of real;
    L:array[1..8,1..8,1..6,1..10] of real;
    nmk:array[1..8,1..8,1..6] of integer;
    V:array[1..8,1..8,1..6,1..10] of integer;
    t,htinteger;
    sec:integer;
    temp:array[1..8,1..8,1..6] of real;
    il,i,j,k,f,w,gd,gm,u,ii,iii:integer;
    h1,h2,h3:real;
    chisl,chisl1,znam,znam2,ho:real;
    lv,tpx,tmx,tpy,tmy,tpz,tmz,toq:real;
    label en,1,raschet;

procedure kaby;
begin
for j:=0 to (hz-1) do
begin
for k:=1 to 15 do
begin
setcolor(7);
line((150+hx*35),350-(j*hy*25)+k,(150+hx*35)+(hy*15),350-j*hy*25)-
(hy*15)+k);
end;
for i:=150 to (150+hx*35) do
begin
setcolor(8);
line(i,350-(j*hy*25),i+(hy*15),350-(j*hy*25)-(hy*15));
setcolor(7);
```

```

line(i,350-(j*hy*25),i,365-(j*hy*25));
end;
end;
setcolor (14);

for j:=0 to (hz-i) do
begin
line(150+(hx*35),365-(j*hy*25),150+(hx*35)+(hy*15),365-(hy*15)-(j*hy*25));
line(150,365-(j*hy*25),150+(hx*35),365-(j*hy*25));
for i:=0 to hx do
begin
line(150+(i*35),350-(j*hy*25),150+(i*35),365-(j*hy*25));
line(150+(i*35),350-(j*hy*25),150+(i*35)+(hy*15),350-(hy*15)-(j*hy*25));
end;
for i:=0 to hy do
begin
line(150+(i*15),350-(i*15)-(j*hy*25),150+(hx*35)+(i*15),350-(i*15)-(j*hy*25));
line(150+(hx*35)+(i*15),365-(i*15)-(j*hy*25),150+(hx*35)+(i*15),350-(i*15)-
(j*hy*25));
end;
end;
end;
procedure vyvodtemp;
begin
for k:=1 to hz do
begin
for j:=1 to hy do
begin
for i:=1 to hx do
begin
u:=trunc(termp[i,j,k]);
str(u,s);
setcolor(15);
if (u>99) then f:=0 else f:=5;
outtextxy(f+113+(i*35)+(j*15),355-(j*15)-((k-1)*hy*25),s);
end;
end;
end;
end;

```

```

end;
end;
begin
clrscr;
textcolor(12); IA.
gotoxy(25,1);writeln('РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ
ЭС');writeln,
textcolor(15);write('Введите длину конструкции (мм)');
textcolor(14);readln(x);writeln;
textcolor(15);write('Введите ширину конструкции (мм)');
textcolor(14);readln(y);writeln;
textcolor(15);write('Введите высоту конструкции (мм)');
textcolor(14);readln(z);writeln;
textcolor(15); write ('Введите число слоев разбиения по длине');
textcolor(14);readln(hz);writeln;
textcolor(15); write ('Введите число слоев разбиения по ширине');
textcolor(14);readln(hy);writeln;
textcolor(15); write ('Введите число слоев разбиения по высоте ');
textcolor(14);readln(hz);writeln;
textcolor(15); write ('Введите количество источников тепла в конструкции');
textcolor(14);readln(nt);writeln;
chscr;
textcolor(12);
gotoxy(25,1);writeln('РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ЭС');
writeln;

```

```

if (nt>(hx*hy*hz)) then nt:=(hx*hy*hz);

```

```

for ii:=1 to nt do

```

```

begin

```

```

textcolor(15); write('Введите координату [X] ',ii,'-го источника тепла');

```

```

textcolor(14);readln(i);

```

```

textcolor(15); write('Введите координату [Y] ',ii,'-го источника тепла');

```

```

textcolor(14);readln(j);

```

```

textcolor(15); write('Введите координату [Z] ',ii,'-го источника тепла');

```

```

textcolor(14);readln(k);

```

```

textcolor(15);write('Введите мощность источника тепла [Вт] ['i','j','k,'];

```

```

textcolor(14);readln(p[ij,k]);
clrscr;
textcolor(12);
gotoxy(25,1);writeln('РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ЭС');writeln; end;
fork:=1 to hz do
begin
forj:=1 to hy do
begin
fori:=1 to hx do
begin
textcolor(15); write('Введите количество материалов в кубике ['i','j','','k,'] ');
textcolor(14);readln(nmk[i,j,k]);
end;

```

```

clrscr;
textcolor(12);
gotoxy(25,1);writeln('РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ЭС');writeln
end;
end;
for k:=1 to hz do
begin
for j:=1 to hy do
begin
for i:=1 to hx do
begin
for ii:=1 to nmk[i,j,k] do
begin
textcolor(15); write('Введите теплопроводность ',ii,'-го материала в кубике
['i','j','','k,'] [Вт/м*K]');
textcolor(14);readln(l[i,j,k,i]);
textcolor(15); write('Введите теплоемкость ',ii,'-го материала в кубике
['i','j','','k,'] [Дж/м^3*K]');
textcolor(14);readln(l[i,j,k,ii]);
textcolor(15); write('Введите занимаемый объем ',ii,'-го материала в кубике
['i','j','','k,'] [%]');
textcolor(14);readln(l[i,j,k,ii]);
end;

```

```

end;
clrscr;
textcolor(12);
gotoxy(25,1);writeln('РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ЭС);writeln
end;
end;
textcolor(15);write(Введите температуру окружающей среды (гр. С)');
textcolor( 14),readln(t);writeln;
textcolor(15);write('Введите желаемый шаг по времени (сек)');
textcolor( 14),readln(t);writeln;
initgraph(gd,gm,'c:\paskal\');
setfillstyle(1,3);
bar(0,0,639,479);
kuby;
fori:=1 to hx do
begin
forj:=1 to hy do
begin
fork:=1 to hz do
begin
temp[i,j,k]:=t;
end;
end;
end;
end;
hl:=(x/hx);
h2:=(y/hy);
h3:=(z/hz);

h0:=(h1+h2+h3)/(3*1000);

lv:=35;
fork:=1 to hz do
begin
forj:=1 to hy do
begin
fori:=1 to hx do
begin

```

```

chisl:=0;
for f:=1 to nmk[i,j,k] do
begin chisl:=chisl+((ho*v[i,j,k,f]/100)*(ho*v[i,j,k,f]/100));
end;
forf:=1 to nmk[i,j,k]do
begin
chisl:=chisl*1[i,j,k,f];
end;
znam2:=0,
for f:=1 to nmk[i,j,k] do
begin
znam:=1;
for w:=1 to nmk[i,j,k] do
begin
znam=znam*(ho*v[ij,k,w]/100)*1[ij,k,w];
end;
znam2:=znam2+znam*(ho*v[i,j,k,f]/100);
end;
znam:= znam2*ho;
l[i,j,k,l]:=chisl/znam;
chisl:=0
forf:=1 to nmk[i,j,k] do
begin
chisl:= chisl+(c[i,j,k,f]*v[i,j,k,f]/100);
end;
c[ij,k,l]:=chisl;
end;
end;
end;
выводtemp;
setcolor(14);outtextxy(250,450,Прошедшее время: 0 сек');
oattextxy(10,20,Температура');
outtextx(10,30;окр.среды: ');
str(t,s);
outtextxy(30,40,'t='+s);
outtextxy(490,20,Размер');
outtextxy(490,30,'кубика:');

```

```

str((x/hx):3:1 ,s);str((y/hy):3:1 ,ss);str((z/hz):3:1,sss);
outtextxy(490,40,s+lc'+ss+ix,+sss+'mm');
str(ht,s);
setcolor(14);outtextxy(10,450,'Шаг по времени T= '+s+' сек. ');
1:
a:=readkey;
if (a=#27) then goto en;
if (a=#13) then goto raschet;
goto 1;
raschet:
for il:=1 to ht do
begin
sec:=sec+1;
for k:=1 to hz do
begin
for j:=1 to hy do
begin
for i:=1 to hx do
begin
if(i>1)thentrmx:=(1/c[i,j,k,l])*2*h1*(l[i,j,k,l]*l[i-1,j,k,l]/(l[i,j,k,l]+l[i,j,k,l]))*
(temp[i-1,j,k]-temp[i j,k]);
if(j>1)thentrmx:=(1/c[i,j,k,l])*2*h2*(l[i,j,k,l]*l[i,j-1,k,l]/(l[i,j,k,l]+l[i,j,k,l]))*
(temp[i,j-1,k]-temp[i j,k]);
if(k>1)thentrmx:=(1/c[i,j,k,l])*2*h3*(l[i,j,k,l]*l[i,j,k-1,l]/(l[i,j,k,l]+l[i,j,k,l]))*
(temp[i,j,k-1]-temp[i j,k]);
if(j<hx)then
tpx:=(1/c[i,j,k,l])*2*h1*(l[i,j,k,l]*l[i+1,j,k,l]/(l[i,j,k,l]+l[i,j,k,l]))*
(temp[i+1,j,k]-temp[i j,k]);
if(j<hy)then
tpy:=1/c[i,j,k,l])*2*h2*(l[i,j,k,l]*l[i,j+1,k,l]/(l[i,j,k,l]+l[i,j,k,l]))*
(temp[i,j+1,k]-temp[i j,k]);
if(k<hz)then
tpz:=(1/c[i,j,k,l])*2*h3*(l[i,j,k,l]*l[i,j,k+1,l]/(l[i,j,k,l]+l[i,j,k,l]))*
(temp[i,j,k+1]-temp[i j,k]);
if (i=1) then tpx:=(1/c[i,j,k,l])*2*h1*(l[i,j,k,l]*lv/(l[i,j,k,l]+lv))*
(t-temp[i j,k]);
if (j=1) then tpy:=1/c[i,j,k,l])*2*h2*(l[i,j,k,l]*lv/(l[i,j,k,l]+lv))*

```



```

(t-temp[i j,k]);
if (k=l) then tpz:=(1/c[i,j,k,l])*2*h3*(l[i,j,k,l]*lv/(l[i,j,k,l]+lv))*
(t-temp[i j,k]);
if (i=hx) then tpx:=(1/c[i,j,k,l])*2*hl*(l[i,j,k,l]*lv/(l[i,j,k,l]+lv))*
(t-temp[i j,k]);
if (j=hy) then tpy:=1/c[i,j,k,l])*2*h2*(l[i,j,k,l]*lv/(l[i,j,k,l]+lv))*
(t-temp[i j,k]);
if (k=h3) then tpz:=(1/c[i,j,k,l])*2*h3*(l[i,j,k,l]*lv/(l[i,j,k,l]+lv))*
(t-temp[i j,k]);
toq:=(p[i,j,k]*l/(c[i,j,k,l]*ho*ho*ho))-(exp((-10/sec)*(p[i,j,k]*
l/(c[i,j,k,l]*ho*ho*ho))));
^ - ;
if (p[i,j,k]>0) then temp[i,j,k]:=temp[i,j,k]+toq;
if (p[i,j,k]=0) then temp[i,j,k]:=temp[i,j,k]+(tmx+ tmy+ tmz+ tpx+ tpy +tpz);

end;
end;
end;
end;
str(sec,s);
setfills1yle(1,3);
bar(250,430,470,470);
setcolor(14);outtextxy(250,450, 'Прошедшее время: '+s+' сек');
kuby;
vyvodtemp;
goto l;
en;
closegraph;
end.

```

Приложение 3

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Материал	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	Теплоемкость C , Дж/(м ³ ·К)
Воздух	0,026	1212
Компаунд	0,6	$1,6 \cdot 10^6$
Стеклотекстолит	0,26	$1,8 \cdot 10^6$
Сердечник трансформатора	58,7	$3,9 \cdot 10^6$
Обмотка трансформатора	390	$3,5 \cdot 10^6$
Радиатор(алюминий)	700	$1,5 \cdot 10^6$
Транзистор	58,7	$3,9 \cdot 10^6$
Резистор	1,1	$1,84 \cdot 10^6$
Диод	58,7	$3,9 \cdot 10^6$

Приложения 4

ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ И ПОПРАВочНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ ИС первой - третьей степени интеграции

Цифровые ИС

Серия ИС	$\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/ч	Серия ИС	$\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/ч
K121	0,20	K556	0,20
K131	0,35	K566	0,10
K155	0,01	K592	0,70
K194	0,40	K599	0,70

Аналоговые ИС

Серия ИС	$\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/ч	Серия ИС	$\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/ч
K122	0,20	K 224	1,50
K157	3,70	K237	2,70
K159	0,10	K276	2,20
K174	2,30	K416	2,70

ИС четвертой и пятой степеней интеграции

Микросхемы для калькуляторов	$\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/ч	Микропроцессорный набор	$\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/ч
К 145(ИА1,886) РЕ1,8Х1,ИП8 ИК6, ИК16	4,0	К 536 ИК-9, К 536 ИК-8, К 536 ИК-5, К 536 ИК-3, К 536 ИР-1, К 536 ГТ-1, К 536 УИ-2.	2.20
Микросхемы ОЗУ			3.60
К 535 РУ1	0.24		0.64
К 535 РУ2	4.90		1.20
К 535 РУ3	2.60		1.80
			0.64
			0.72
Гибридные микросхемы			
К2ХА 371	1.23	К2ХА 372 К2ХА 345 К1УТ 401Б К20П 241	1.23
К2ХА 373	1.23		1.23
К2ХА 376	1.23		1.00
К174 УВ4	1.50		0.36
К80111А	0.77		35

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Наименование и тип диода	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$	Наименование и тип диода	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$
Выпрямительные диоды, столбы, блоки			
ГД 107(а,б)	0.07	ГД 402(а,б)	0.11
Универсальные диоды			
Д 105(А)	0.10	Д 9(Б-М)	0.05
Д 202-Д 205	0.10	Д 104(А)	0.10
Д 226(А-Д)	0.10	Д 106(А)	0.10
Д 242(А,Б)	0.21	Д 223(А,Б)	0.10
Д 245(А,Б)	0.21	Д 243(А,Б)	0.21
Д 247(А,Б)	0.21	Д 246(А,Б)	0.21
	0.35	Д 248(Б)	0.21
КД 105(Е,В,Г)		КД 202(А-Н)	0.35
Варикапы			
Д 902	0.27	КВ 103(А,Б)	0.27
КВ 104(А-Д)	0.27		
Стабилитроны и стбисторы			
КС 133А	0.10	КС 139А	0.10
КС 147А	0.10	КС 168А,В	0.10
КС 170	0.10	КС 175А	0.10
КС 182А	0.10	КС 191А	0.10
Д 816(А-Д)	0.09	Д 815(А-Ж)	0.09

ТРАНЗИСТОРЫ

Наименование и тип транзистора	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$	Наименование и тип транзистора	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$
Транзисторы малой мощности низкой частоты			
ГТ 108(А-Г)	0.15	ГТ 109(А-И)	0.15
МП 21(В-Е)	0.18	МП 20(А,В)	0.18
МП 26(А,Б)	0.18	МП 35	0.15
МП 36А	0.15	МП 37(А,Б)	0.15
МП 38	0.15	МП 39(А,Б)	0.15
МП 40А	0.15	МП 42(А,Б)	0.15
МП 111(А,Б)	0.10		0.10
Транзисторы малой мощности средней частоты			
П 29А	0.23	МП 30	0.23

Транзисторы малой мощности высокой частоты			
ГТ 308(А-В)	0.36	ГТ 320 (А-В)	0.50
ГТ 313(А,Б)	0.50	ГТ 322 (А-Е)	0.50
ГТ 321(А-Е)	0.50	ГТ 330 (Д,Ж,И)	0.30
ГТ 329(А-В)	0.30	КП 301Б	0.10
ГТ 341(А-В)	0.30	КП 306(А-В)	0.10
КП 302(А-Е)	0.10	КТ 301(А-Ж)	0.31
КП 350(А-В)	0.10	КТ 307(А-Г)	0.31
КТ 306(А-Д)	0.31	КТ 315(А-Е)	0.31
КТ 312(А-В)	0.31	КТ 342	0.28
КТ 339	0.28	КТ 361(А-Г)	0.28
КТ 345(А-В)	0.28	П 402	0.33
П 401	0.33	П 416(А,Б)	0.33
П 403А	0.33		
П 422	0.33		
Транзисторы средней мощности низкой частоты			
ГТ 402(А-Г)	0.37	ГТ 403(А-Д)	0.37
ГТ 404(А-Г)	0.37	П 201Э	0.25
П 210Е	0.25	КТ 3102	0.15
КТ 626	0.27	КТ 3107	0.18
Транзисторы средней мощности средней частоты			
П 601Ц	0.27	П 601АИ	0.27
П 601БИ	0.27	П 602Ц	0.27
П 605(А)	0.27	П 606(А)	0.27
Транзисторы средней мощности высокой частоты			
КТ 601А	0.27	КТ 601А	0.27
КТ 602(А-Г)	0.27	КТ 603(А-Е)	0.27
КТ 604(А)	0.27	КТ 605(А,Б)	0.27
П 607(А)	0.37	П 608(А)	0.37
П 609(А)	0.37		
Транзисторы большой мощности низкой частоты			
ГТ 701А	0.51	П 213(А-В)	0.35
П 214(А-Г)	0.35	П 217	0.35
Транзисторы большой мощности средней частоты			
ГТ 806(А-Д)	0.70	КТ 801(А,Б)	0.46
КТ 802(А)	0.57	КТ 803(А)	0.57
КТ 805(А,Б)	0.57	КТ 808(А)	0.57
КТ 807	0.35		
Примечание: коэффициент электрической нагрузки для транзисторов не должен быть более 0.8			

РЕЗИСТОРЫ

Наименование и тип резистора	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/ч	Наименование и тип резистора	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/ч
Резисторы постоянные непроволочные			
BC-0.125(a)	0.008	BC-0.25(a)	0.01
BC-0.5(a)	0.03	МЛТ-0.125	0.007
MT-0.125	0.007	ОМЛТ-0.125	0.007
МУН-0.125	0.007	МПТ-0.125	0.007
МЛТ-0.25	0.01	MT-0.25	0.01
МУН-0.25; МПТ-0.25	0.01	ОМЛТ-0.25	0.02
ОМЛТ-0.5; МУН-0.5	0.02	МЛТ-0.5; MT-0.5	0.02
МЛТ-1; MT-1; ОМЛТ-1	0.08	МПТ-0.5; УЛИ-0.5	0.08
МЛТ-2; MT-2; ОМЛТ-2	0.12	МУН-1; МПТ-1	0.12
КИМ-0.05	0.05	МУН-2; МПТ-2	0.10
КЛМ, КВМ	0.12	КИМ-0.125	0.08
УЛИ-0.25	0.01	УЛИ-0.125	0.06
МОН-0.5	0.02	УЛИ-1	0.08
		МОН-1	
Резисторы постоянные проволочные			
C5-5(T); C5-16T	0.10	ПЭ; ПЭВ; ОПЭВЕ; ПЭВТ	0.06
Терморезисторы			
ММТ; КМТ	0.18	СТ1-17; СТ3-17	0.15
Резисторы переменные непроволочные			
СП-I; СП-V	0.20	СП-II; СП-0.4	0.15
СП-III; СП2-3a	0.30	СП-IV	0.25
СП2-3б; СП3-22	0.30	СП3-1(a,б)	0.45
СП3-4M(a-г)	0.65	СП3-4Mд	0.70
СП3-8	0.57	СП3-12(a-в,к)	0.45
СП3-12(г-е,и,л)	0.80	СП3-23; СП3-26	0.30
СП3-27	0.30	БК	0.31
БКУ	0.33	ТК	0.58
ТКД(a,б)	0.77	СНК(a,б)	0.45
СНКВД(a,б)	0.89	СП-015; СПО-0.5	0.28
СПО-1; СПО-2	0.40		
Резисторы переменные проволочные			
ППЗ-40; ППЗ-41	0.40	ППЗ-43	0.40
Примечание: коэффициент электрической нагрузки для резисторов не должен быть более 0.7			

КОНДЕНСАТОРЫ

Наименование и тип конденсатора	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/ч	Наименование и тип конденсатора	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/ч
Конденсаторы постоянной емкости с керамическим диэлектриком			
КЛГ; К10-70	0.10	КЛС	0.06
КЛС-Е; КМ; КП; КПС	0.08	КД	0.018
КДУ	0.015	КТ; КТП	0.012
К10-35	0.07	К10-26; К10-28	0.07
Конденсаторы постоянной емкости со стеклянным диэлектриком			
К21У-1; К21У-3	0.06	К21-5; К21-7; К21-8	0.06
СКМ; СКМ-Т; К22У-1	0.04	КС	0.10
Конденсаторы постоянной емкости со слюдяным диэлектриком			
КСГ; КСО; КСОТ	0.02	СТМ; К31У-3Е	0.02
Конденсаторы постоянной емкости с бумажным диэлектриком			
БМ; К4011	0.10	БМГ	0.12
КБГ	0.02	СМ; К42У-2	0.05
К40П-1; К40П-2	0.08	К40П-3	0.08
МБМ	0.09	МБГ; МБП	0.04
Конденсаторы постоянной емкости с диэлектриком из оксидного слоя на вентильных металлах			
КЭ; ЭГЦ; К53-1	0.06	К53-4; К53-14	0.06
ЭМ; К50-12; К52-2	0.12	К50-3; К50-3(А,Б)	0.10
К50-6	0.07	К50-7; К50-9	0.09
Конденсаторы постоянной емкости с органическим диэлектриком			
ПМ; МПО; МПГО	0.10	МПГ-П; МПГ-Ц	0.10
К70-7	0.08	К71-3; К71-4; К71-5	0.09
ФЧ; К72-9; ПМПП	0.04	К73-5	0.07
К73-6; К73П-2	0.05		
Конденсаторы с твердым диэлектриком			
КПК; КПК-МТ	0.03	КТ4-1; КТ4-2	0.05
Примечание: коэффициент электрической нагрузки не должен быть более 0.9 для электролитических конденсаторов, и более 0,7 - для остальных конденсаторов			

РАДИОКОМПОНЕНТЫ

Магнитоуправляемые контакты

Наименование и тип	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-9}$, 1/сраб	Наименование и тип	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-9}$, 1/сраб
КЭМ-3	58.0	КЭМ-2	2.10
МКА-27101	9.50	МКА-10501	3.80
КЭМ-6	5.70	МКА-27102	11.0
МК-10-3	4.30	МКС-27103	14.0
МУК1А-1	14.0	МКА-52141	56.0
Значения $Kэ$ для различных групп аппаратуры: наземная стационарная-0.4; наземная подвижная-1; на судах-0.8			

Трансформаторы и дроссели

Наименование и тип прибора	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/ч	Наименование и тип прибора	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/ч
Трансформаторы:			
Силовые	0.96	Выходные звука	1.0
Выходные кадровые	0.70	Выходные строчные	2.0
Дроссели:			
Фильтровочные	0.14		

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Уровни конструктивной сложности РЭС	4
1.1. Введение.....	4
1.2. Анализ конструкций РЭС.....	8
1.3. Оценка потребительских свойств РЭС.....	20
1.4. Конструктивная иерархия и основные направления конструирования электронных средств.....	29
1.5. Типовые конструкции радиоэлектронных средств.....	34
2. Условия эксплуатации радиоэлектронных средств	38
2.1. Дестабилизирующие факторы и их влияние на работоспособность РЭС.....	38
2.2. Влияние температуры на работоспособность РЭС и ее элементов..	39
2.3. Влияние атмосферного давления на работоспособность РЭС.....	42
2.4. Влияние влаги на работу РЭС.....	44
2.5. Влияние механических воздействий на работоспособность РЭС...	46
3. Моделирование процессов в РЭС	50
3.1. Понятие моделирования и типы моделей.....	50
3.2. Моделирование процессов на основе аналогии.....	52
3.3. Кибернетическое моделирование.....	53
3.4. Управление моделями устройств РЭС.....	54
3.5. Моделирование в процессе проектирования РЭС.....	56
3.5.1. Электрические модели РЭС.....	56
3.5.2. Определение основных параметров РЭС в процессе моделирования.....	58
3.5.3. Моделирование проектных задач.....	61
3.6. Алгоритм автоматизированного проектирования РЭС.....	63
3.7. Моделирование в процессе автоматизированного проектирования РЭС.....	65
3.8. Основы моделирования конструкций и технологических процессов производства РЭС.....	68
4. Надежность электронных средств	71
4.1. Основные понятия надежности ЭС.....	71
4.2. Расчет надежности при проектировании ЭС.....	74
4.3. Расчет показателей надежности РЭС.....	78

5. Проектирование конструкций электронных средств.....	85
5.1. Выбор и обоснование метода и принципа конструирования.....	85
5.2. Технологические процессы, применяемые при изготовлении РЭС..	87
5.3. Расчеты тепловых режимов РЭС.....	89
5.4. Цифровое моделирование температурных полей РЭС.....	97
6. Электрический монтаж РЭС.....	107
6.1. Внутри- и межблочный монтаж.....	107
6.2. Перспективы развития электрических соединений.....	120
Список использованной литературы.....	130
Приложения.....	131

Учебное издание

**Зеленский Анатолий Васильевич
Краснощекова Галина Федоровна**

**ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА.
КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ**

Учебное пособие

Редактор Л. Я. Ч е г о д а е в а
Доверстка Т. Е. П о л о в н е в а

Подписано в печать 28.10.2010. Формат 60х84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 9,5. Тираж 100 экз. Заказ .

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

Издательство Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086, Самара, Московское шоссе,34.

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

А.В. ЗЕЛЕНСКИЙ, Г.Ф. КРАСНОЩЕКОВА

ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА. КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ

САМАРА 2010