

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

А.В. Зеленский,  
Г.Ф. Краснощекова

# ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» в качестве учебника для студентов, обучающихся по программам высшего образования по направлениям укрупненной группы 210000 Электронная техника, радиотехника и связь

САМАРА  
Издательство СГАУ  
2014

УДК 004.9(075)

ББК 32.97.я7

3486

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В. Н. Нестеров;  
д-р техн. наук, проф. С. А. Матюнин

**Зеленский А.В.**

3486 **Основы конструирования электронных средств:** учеб. для студентов вузов / *А.В.Зеленский, Г.Ф.Краснощекова.* – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2014. – 228 с.

**ISBN 978-5-7883-0911-8**

В настоящее время электронные средства применяются практически во всех отраслях хозяйства и потребность в них все более и более возрастает. Темпы развития радиоэлектроники требуют повышения технологического уровня ЭС, который определяется повышением требований к надежности, обеспечением защиты от дестабилизирующих факторов и др. Реализация этих требований зависит от достижений в области конструирования и технологии производства ЭС. Все это ведет к необходимости разработки новых конструкций, поэтому подготовка инженеров конструкторов-технологов по направлению «Проектирование и технология ЭС» должна опираться на высокую конструкторскую базу.

Конструирование ЭС определяется особенностью организации внутренних связей, когда кроме пространственных и механических связей необходимо реализовать электрические, магнитные, акустоэлектрические и уменьшить до допустимых пределов паразитные электромагнитные и тепловые связи. Эти особенности настолько существенны, что выделяют конструирование ЭС в отдельную отрасль.

В настоящее время существует целый ряд работ, по которым готовят специалистов, однако возрастание такой информации делает актуальной подготовку учебника, который отражал бы достижения в области конструирования ЭС. В предлагаемом учебнике основным принципом является постепенное введение читателя в проблемы конструирования, что дает возможность полноценно усвоить основные понятия и определения вместе с последующим нарастанием сложности материала.

В основе книги лежат материалы, накопленные за многолетнюю работу авторов на кафедре КиПРЭС СГАУ, использован опыт зарубежного обучения в данной области, нормативные документы, обширный материал отечественных и зарубежных авторов, полученный через Интернет.

Авторы признательны за доброжелательные замечания со стороны рецензентов, за ряд советов, учтенных авторами в данной работе.

Учебник предназначен для студентов радиотехнического факультета.

УДК 004.9(075)

ББК 32.97.я7

ISBN 978-5-7883-0911-8

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2014

---

---

## ВВЕДЕНИЕ

---

---

Анализ современной научно-технической и учебной литературы в области конструирования радиоэлектронных средств заставляет задуматься о недостаточно концентрированном изложении вопросов проектирования радиоэлектронных средств (ЭС) для студентов.

На данном этапе развития радиоэлектроники значительное внимание уделяют системному подходу при разработке ЭС, что позволяет учитывать всю последовательность этого сложного процесса (проектирования, изготовления, испытания и эксплуатации).

Так как конструирование является раскрытием геометрической формы конструкции, обеспечивающей заданные параметры ЭС при наилучшем использовании материалов, в книге большое внимание уделяется анализу связей параметров конструкции с ее геометрией и свойствами материалов.

В процессе написания учебника авторами проведено обобщение работ таких ведущих специалистов в области конструирования, как Б.Ф. Высоцкий, П.Г. Гелль, Г.Н. Дульнев, Б.Н. Деньдобренко, Е.Н. Маквецов, Т.А. Рычина.

Основная цель книги – показать общие принципы и методику конструирования ЭС, определить основные задачи, стоящие перед конструктором, изложить математические основы, методы и алгоритмы их решения, осветить тенденции развития конструкций и их элементов. Дать комплекс знаний, который позволил бы студенту овладеть теоретическими основами, и получить на базе приведенных примеров, справочного и иллюстрационного материала практические навыки разработки конструкции, удовлетворяющие требованиям технического задания.

Учебник включает в себя следующие разделы:

- внешние и внутренние воздействия на ЭС (механические, тепловые, климатические);

- узлы и несущие конструкции ЭС (материалы узлов и несущих конструкций);
- моделирования процессов в ЭС (виды моделей, построение математических моделей);
- проектирование узлов и конструкций ЭС (системный подход при проектировании, поверочный расчет электрической схемы ЭС, внешняя и внутренняя компоновка, расчет ПГ различных цепей, надежности, тепловые режимы ЭС).

Весь теоретический материал подкреплен конкретными расчетами, которые будут полезными для студентов при изучении курсов конструкторского профиля, моделирования ЭС, при выполнении курсовых и дипломных проектов, а также для самостоятельной работы.

В заключении автор благодарит всех своих коллег, которые в свое время вместе с ним создавали кафедру конструирования радиоэлектронной аппаратуры.

Развитие радиоэлектроники 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 радиоэлектроники, 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 радиоэлектроники. Надежность этих изделий закладывается при их проектировании, обеспечивается при производстве и поддерживается при эксплуатации в составе ЭС. С другой стороны, изделия радиоэлектроники должны рассматриваться как результат разработки схемы, конструкции и технологии. Рассмотрим основные определения понятий и связанных с ними терминов. Исходными являются понятия радиоэлектроники и радиотехники. Радиоэлектроника – это область науки и техники, охватывающая широкий круг вопросов использования электромагнитной энергии для передачи, приема и преобразования сигналов и содержащейся в них информации.

Радиотехника – область науки и техники, связанная с генерированием, преобразованием, излучением и приемом электромагнитных колебаний и волн радиочастотного диапазона. В соответствии с международным регламентом границы радиочастот лежат в пределах 3 кГц...3 ГГц, которым соответствуют длины волн от 100 км до 0,1 мм. Таким образом, радиотехника является частью радиоэлектроники. Кроме того, к радиоэлектронике относят технику инфранизких частот, инфракрасную технику и оптоэлектронику. С технической стороны радиоэлектроника также охватывает автоматику, техническую кибернетику, вычислительную технику и электронику.

Как отрасль промышленности радиотехника связана с разработкой, производством и применением радиоаппаратуры для радиосвязи, радиовещания, телевидения, радиолокации, радионавигации и других направлений техники передачи информации. В более широком смысле вместо слова радиоаппаратура применяется термин электронные средства (ЭС), под которым подразумеваются приборы и технические устройства, предназначенные для преобразования электрических и электромагнитных сигналов с определенными целями. Наиболее общим названием изделий радиоэлектроники, рекомендованным в стандартах, является термин радиоэлектронное средство, понимаемый как техническое изделие определенной сложности или его составная часть, в основу действия которого положены принципы радиотехники и электроники. По функциональной сложности ЭС разделяют на уровни: система, комплекс, устройство, узел, что отражено на рис.В1,В2. Радиоэлектронная (РЭ) 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. В состав такой системы входят бортовой радиоэлектронный комплекс и наземные радиолокационный и вычислительный комплексы, которые, в свою очередь, состоят из РЭУ, т.е. ЭС более низкого уровня. Перестроение структуры данной системы вызывается условиями воздушной обстановки в районе аэродрома, в зависимости от интенсивности воз-

душного движения назначается оптимальная (с точки зрения безопасности) совокупность работающих ЭС.

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

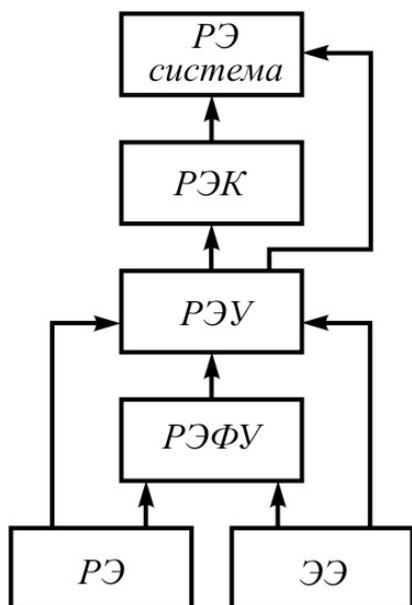


Рис. В1. Уровни разукрупнения ЭС по функциональной сложности

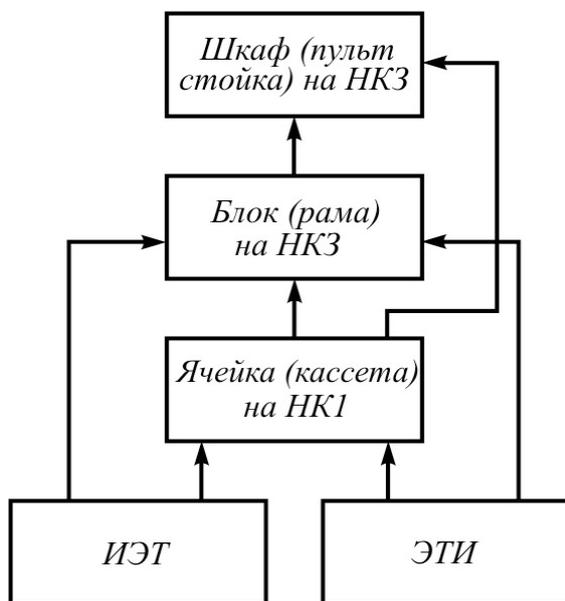


Рис. В2. Уровни разукрупнения ЭС по конструктивной сложности

Разновидностью РЭ системы является радиотехническая система, под которой понимают совокупность ЭС для передачи сообщений и команд по радиоканалам, состоящих из радиопередатчиков, линий радиосвязи и радиоприемников. Другой важной разновидностью РЭ системы служит вычислительная система, определяемая как взаимосвязанная совокупность вычислительных комплексов и устройств, согласованных по быстродействию, пропускной способности и другим параметрам. Отличительным признаком как радиотехнической, так и вычислительной системы является возможность перестроения ее структуры с целью наиболее эффективного использования входящих в систему технических средств.

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

Радиоэлектронный комплекс (РЭК) – это ЭС в виде совокупности функционально связанных РЭУ, обладающих свойством изменения струк-

туры 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.

В качестве второго примера ЭС рассмотрим вычислительный комплекс, состоящий из двух или большего количества компьютеров с собственными устройствами ввода—вывода, коммутаторами и дополнительными устройствами для информационного обмена между компьютерами. Техническая задача такого комплекса—обработка информации. При выходе из строя одного компьютера его функцию берет на себя другой компьютер. Работоспособность комплекса при этом сохраняется, но снижается его пропускная способность либо ограничивается круг решаемых задач.

Радиоэлектронное устройство (РЭУ) – есть ЭС в виде функционально законченной сборочной единицы, которая выполнена на несущей конструкции и реализует функции приема, преобразования и передачи информации или решает техническую задачу на их основе. 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.

Еще одной иллюстрацией РЭУ может служить курсовой радиомаяк, предназначенный для изучения радиосигналов, содержащих информацию для управления самолетом по азимуту при заходе на посадку и во время посадки.

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

Каждый из рассмотренных РЭУ может эксплуатироваться самостоятельно или в составе РЭК (РЭ системы). Любое РЭУ структурно разделяется на радиоэлектронные функциональные узлы, которые являются ЭС первого уровня, состоящие, в свою очередь, из элементов нулевого уровня функциональной иерархии: радиоэлементов (РЭ) и электротехнических элементов (ЭЭ) (рис. В1).

Некоторые РЭ и ЭЭ могут входить непосредственно в РЭУ.

Радиоэлектронный функциональный узел (РЭФУ) – есть ЭС в виде законченной сборочной единицы, которая выполнена на несущей конструкции и 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 – функцию 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 ЭС имеют четыре уровня иерархического деления, показанные на рис. В2. Здесь нулевой уровень составляют изделия электронной техники (ИЭТ) и электротехнические изделия (ЭТИ). Они входят в радиоэлектронные ячейки или кассеты, выполненные на основе несущей конструкции первого уровня (НК1). На несущих конструкциях второго уровня (НК2) строятся радиоэлектронные блоки или рамы, которые могут включать в себя как ячейки (кассеты), так и ИЭТ с ЭТИ. Наконец, на несущих конструкциях третьего уровня (НК3) разрабатываются радиоэлектронные шкафы, пульта или стойки, в которые входят конструкции как второго, так и первого уровня.

Наличие двух видов классификации уровней разукрупнения (рис. В1 и В2) свидетельствует о том, что в любом ЭС как готовом изделии различают две непосредственно взаимосвязанные части: электрическую схему и конструкцию.

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

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

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

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

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

создания конструкций и усиление взаимосвязи конструирования с *системотехникой*, схемотехникой, технологией и эксплуатацией ЭС.

Технология ЭС как область техники – совокупность способов обработки, изменения состояния, свойств и формы материалов, изготовления полуфабрикатов (деталей, узлов, устройств) и их сборки с определенной точностью и производительностью в процессе производства для получения готового ЭС. С другой стороны, технология ЭС как прикладная научная дисциплина – это обобщенное представление физических, химических, механических и других закономерностей и методов воздействия на материалы соответствующими орудиями производства.

Эксплуатация ЭС как область техники – совокупность способов транспортировки, хранения, установки и технического обслуживания ЭС при их функциональном использовании по назначению. В то же время эксплуатация ЭС как прикладная научная дисциплина—это системное представление методов и условий наилучшего использования аппаратуры для заданных целей с высокой надежностью и эффективностью.

Как уже подчеркивалось выше, эксплуатация ЭС характеризуется воздействием на них внешних факторов, которые обязательно должны быть учтены при конструировании, разработке технологии производства и особенно при обеспечении надежности.

В настоящее время получает развитие принципиально новая технология проектирования, сущность которой заключается в замене объекта проектирования его моделью и дальнейшем ее исследовании с помощью компьютера. Таким образом, физический эксперимент на макетах и опытных образцах заменяется вычислительным экспериментом на математических моделях ЭС и технологических процессов. Именно математическое моделирование на компьютере позволяет на стадии создания проекта аппаратуры в короткие сроки провести большой объем расчетов и исследований, отработать проект с целью исключения отказов при эксплуатации. В материал настоящего учебника включены основные вопросы, освещающие указанный выше современный подход к конструированию и производству высоконадежного ЭС. Ключевым моментом данного подхода является математическое моделирование на компьютере.

Трудности здесь состоят в том, что разные физические процессы, протекающие в аппаратуре, описываются различными законами, напри-

мер электрические процессы в цепях с сосредоточенными параметрами – обыкновенными дифференциальными уравнениями, а в цепях с распределенными параметрами – волновыми уравнениями, тепловые процессы в элементах конструкций – уравнениями теплопроводности в частных производных второго порядка, а механические процессы колебаний печатных узлов – бигармоническими уравнениями в частных производных четвертого порядка. С учетом граничных условий согласовать такие разные модели между собой, чтобы соединить их вместе в единую машинную модель аппаратуры, очень трудно из-за больших затрат вычислительных ресурсов компьютеров.

Выход из создавшегося положения лежит в унификации математических моделей разнородных физических процессов, что значительно снижает трудоемкость соединения их в единую комплексную модель и позволяет провести системный анализ надежности проектируемой аппаратуры с помощью компьютеров.

---

---

## 1. КОНСТРУКТИВНЫЕ УРОВНИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

---

---

Под ЭС понимают класс электронных устройств, способных принимать, хранить, перерабатывать и выдавать информацию с помощью вычислительных и логических операций по определенному алгоритму или программе. К ним также относятся и компьютеры всех видов общего и специального назначения с устройствами периферийной автоматики, тестового контроля и сервисной аппаратурой. Наиболее представительным классом являются цифровые ЭВМ, далее следуют аналоговые вычислительные машины (АВМ) и аналого-цифровые (АЦВМ). Составленные из них вычислительные комплексы и системы также относятся к ЭС (следует заметить, что цифровые ЭВМ представляют собой в настоящее время наиболее разработанный класс ЭС, что стало возможным благодаря трудам советских и зарубежных ученых по их теории, конструированию и математическому обеспечению).

ЭС находят применение в научных исследованиях при моделировании и оптимизации изучаемых процессов, в задачах анализа и синтеза исследуемых технологических структур, в инженерно-экономических исследованиях, в системах управления различного рода процессами, включая АСУ и АСУТП, как самостоятельные приборы для научных исследований и целей управления. Сферы применения ЭС все более расширяются, и она используется практически во всех отраслях народного хозяйства страны.

ЭС различаются по видам, области применения, конструктивному исполнению, принципу действия, назначению и элементной базе.

По видам ЭС разделяется на наземную и бортовую. Первая эксплуатируется в наземных условиях, вторая в околоземном пространстве, в ак-

ваториях морей и океанов и в условиях открытого космоса (может также эксплуатироваться и в наземных условиях).

По области применения различают ЭС общетехническую, бытовую, самолетную, морскую, космическую и специальную. Общетехническая аппаратура применяется для решения научных, инженерных и экономических задач; бытовая используется в повседневной жизни людей; самолетная эксплуатируется на всех видах летательных аппаратов, совершающих полеты в пределах тропосферы (до 17 км над уровнем моря) и стратосферы (до 85 км над уровнем моря), морская – на всех видах судов; космическая – на метеорологических зондах, искусственных спутниках Земли, космических кораблях и станциях, работающих в условиях ионосферы, т. е. удаленных от поверхности Земли более чем на 85 км. Специальная ЭС может быть как наземной, так и бортовой.

По конструктивному исполнению различают стационарную, перевозимую (транспортируемую) и переносную ЭС. Первая предназначена для эксплуатации в стационарных помещениях, вторая – в полевых условиях, на различных наземных транспортных средствах, а переносная может быть использована в обоих указанных случаях.

По принципу действия ЭС подразделяют на цифровую, аналоговую и цифроаналоговую. Цифровая и аналоговая аппаратура использует соответственно основные схемотехнические принципы цифровой вычислительной и аналоговой техники, цифроаналоговые ЭС – комбинацию этих принципов.

По назначению различают универсальную, управляющую и контрольную ЭС. Универсальная аппаратура рассчитана на широкое применение и решение различного рода научных и инженерных задач, управляющая и контрольная предназначена соответственно для управления и контроля различного рода процессов. Бортовая ЭС, как правило, является управляющей, т. е. она работает в замкнутом контуре управления объектом.

В зависимости от вида элементной базы различают ЭС, выполненную на электронных лампах (I поколение), на дискретных полупроводниковых приборах (II поколение), на ИМС (III поколение) и БИС (IV поколение).

Независимо от конструктивно-технологических признаков, характеризующих ЭС, главная её особенность состоит в том, что она и схемно и конструктивно состоит из часто повторяющихся типовых стандартных узлов, выполненных, как правило, на единой элементной, конструктивной и

технологической базе. Это открывает широкие возможности для автоматизации не только ее конструирования, но и серийного производства.

Аппаратуру, выполненную на ИМС (БИС), называют микроэлектронным средством (МЭС). В основе ее создания лежит широкое использование базовых технологических процессов, характеризующихся единством используемых материалов, высокой степенью автоматизации управления и контроля качества. Эта аппаратура является наиболее перспективной, так как в настоящее время она характеризуется наилучшими массогабаритными, надежностными, а в ряде случаев и экономическими показателями, а также высоким быстродействием, точностью выполнения операций и малой потребляемой мощностью. Основой МЭС являются интегральные микросхемы.

Показателем степени сложности и совершенства ИМС (БИС) является степень их интеграции, характеризующаяся числом содержащихся в них элементов и компонентов. Она оценивается формулой

$$k = \lg N, \quad (1.1)$$

где  $k$  – коэффициент, определяющий степень интеграции (округляемый до ближайшего большего целого числа);  $N$  – число элементов и компонентов, входящих в ИМС (БИС).

В настоящее время в соответствии с ГОСТ 17021-75 различают пять степеней интеграции интегральных микросхем: 1-я степень интеграции – ИМС содержит до 10 элементов и компонентов включительно; 2-я степень интеграции – ИМС содержит от 10 до 100 элементов и компонентов; 3-я степень интеграции – ИС содержит от 100 до 1000 элементов; 4-я степень интеграции – ИМС содержит от 1000 до 10000 элементов; 5-я степень интеграции характеризуется числом элементов и компонентов в ИМС от 10000 до 100000.

### **1.1. Иерархический принцип построения ЭС**

Современная ЭС проектируется по иерархическому принципу, т. е. сколь угодно сложные системы (высших рангов) komponуются из типовых и более простых устройств (низших рангов). Эти устройства состоят из частей различной степени сложности или различных структурных уров-

ней. Каждый структурный уровень характеризуется элементной, конструктивной и технологической однородностью. На рис. 1.1 в качестве примера приведена иерархическая структура ЭС второго поколения, которая условно изображена в виде ряда прямоугольников, входящих друг в друга.

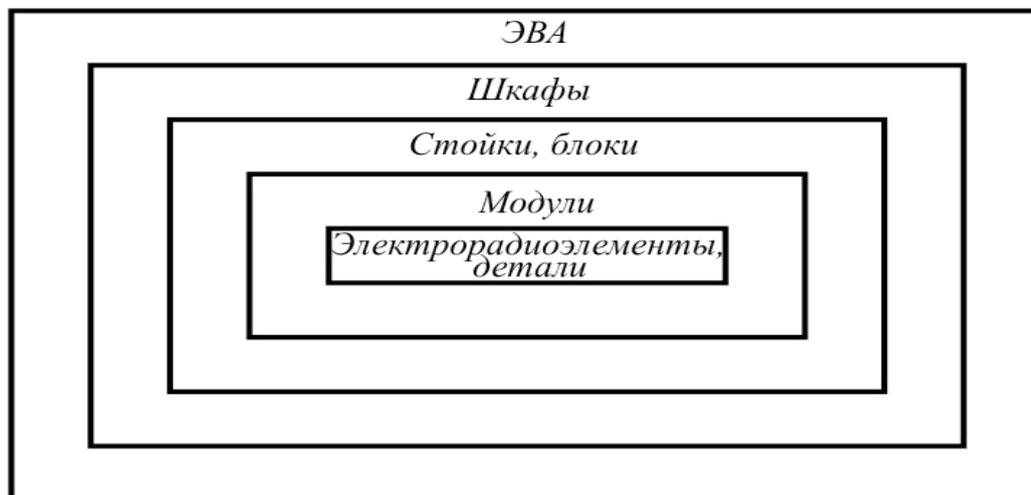


Рис. 1.1. Иерархическая структурная схема ЭС второго поколения

В соответствии с ней иерархия ЭС начинается с нулевого структурного уровня, который называется *элементным базисом*. Он включает в себя неделимые схемные электрорадиоэлементы и детали, представляющие собой первичные объекты сборки, из которых собираются узлы и модули, входящие в первый структурный уровень ЭС. Узлы, выполняющие возложенные на них функции вне зависимости от других частей конструкции ЭС, называют *функционально-автономными* или *модулями*. Узлы, выполняющие возложенные на них функции только при наличии связей с другими частями конструкции ЭС, называются *технологическими*. Примерами технологических узлов могут служить каркасы катушек с обмотками дросселей, трансформаторов и т. п.

Функционально-автономные и технологические узлы объединяют в блоки и стойки. В отличие от устройств первых двух структурных уровней иерархии, конструктивным признаком *блока* является наличие *лицевой панели*. Блоки могут быть механическими, электрическими, электромеханическими, электронными, оптическими, акустическими и т. п. Сочленение блоков в единой конструкции называют *стойкой*. Блоки и стойки образуют

второй структурный уровень иерархии ЭС. Сочетание стоек в единой конструкции называется *шкафом*. Конструктивным признаком *шкафа* является наличие *съёмной панели* (или двери), обеспечивающей доступ к его содержимому. Шкафы образуют третий структурный уровень иерархии ЭС. Заметим, что в зависимости от сложности ЭС число устройств в каждом структурном уровне может быть самое различное. МЭС сохраняет полностью иерархический принцип построения, но ее иерархическая структурная схема имеет несколько другой вид (рис. 1.2). Объясняется это тем, что на низших уровнях иерархии МЭС применяются ИМС, которые, являясь ее элементарным базисом, и схемно-конструктивно несравненно сложнее электрорадиоэлементов нулевого уровня схемы на рис. 1.1.

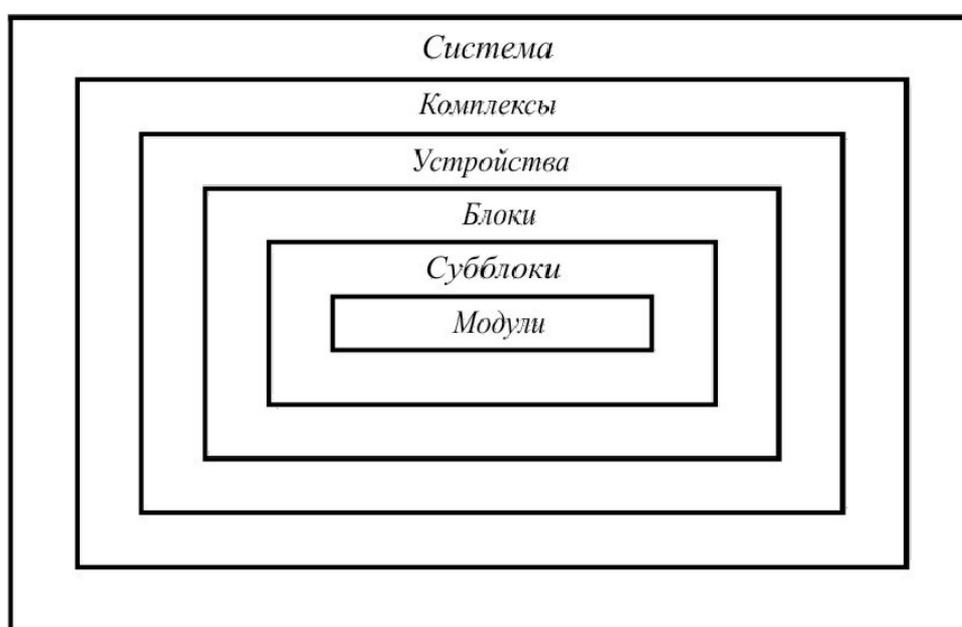


Рис. 1.2. Иерархическая структурная схема МЭС

Они большей частью представляют собой модули. В соответствии со схемой эти модули объединяют далее в субблоки, блоки, устройства и комплексы.

Высшим уровнем иерархии МЭС является система. Заметим, однако, что рассмотренные иерархические структурные схемы являются в значительной степени условными, ибо они отражают в основном достигнутую на современном этапе развития техники степень интеграции изделий микроэлектроники.

## 1.2. Классификация ЭС

Электронные средства удобно классифицировать по следующим признакам: виду аппаратуры, области ее применения, способу конструктивного выполнения, принципу действия, назначению и элементной базе. В соответствии с перечисленными признаками классификация ЭС представлена на рис. 1.3 (направление связей между признаками указано стрелками).

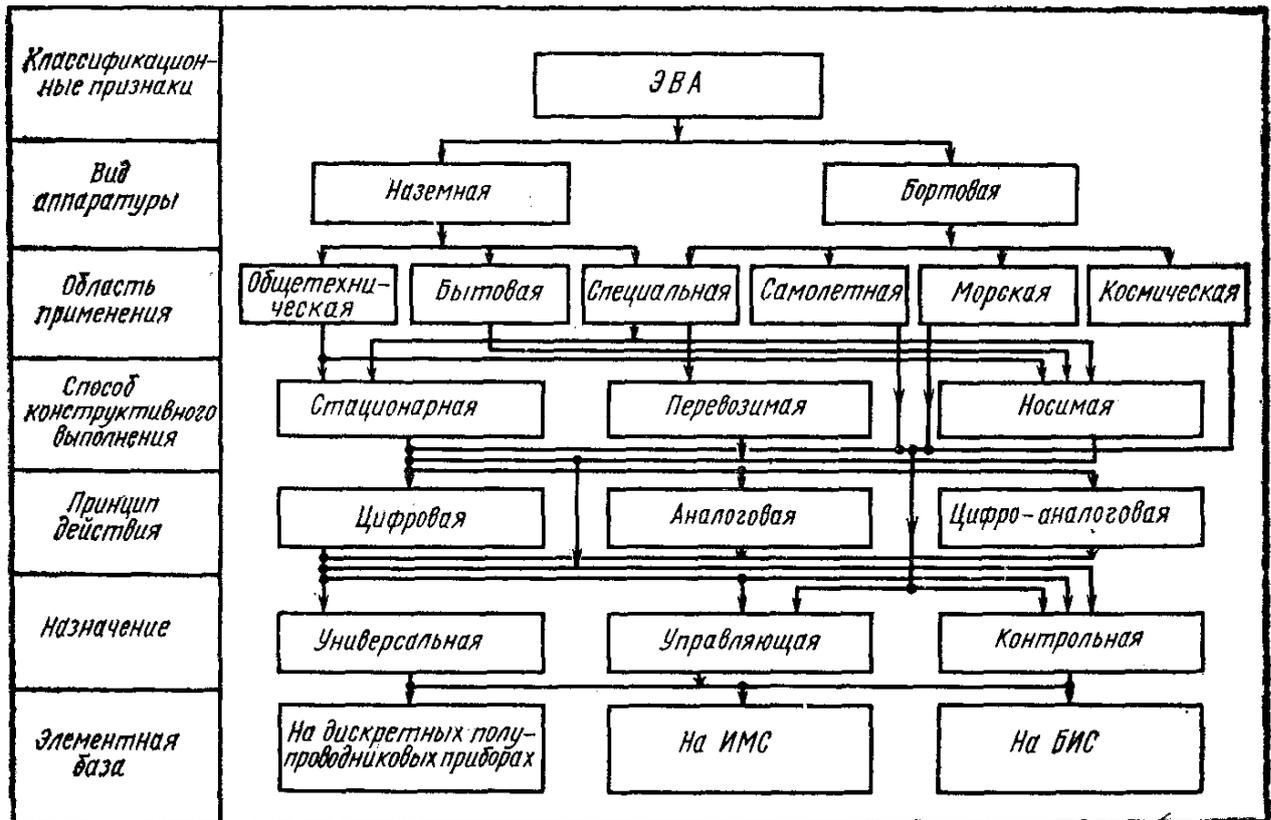


Рис. 1.3. Классификация ЭС

Приведенная классификация достаточно укрупненная, но она позволяет выделить главные отличительные признаки ЭС различных видов.

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

### 1.3. Методология проектирования

*Модели конструирования и требования к ним.* В настоящее время значительно усложнились объекты проектирования, повысились требования, предъявляемые к ним, что заставило отказаться от традиционных методов проектирования и перейти к новым методам – системным. Системное проектирование невозможно без научной основы, без обобщения известных ранее методов проектирования, их анализа.

Проектирование включает три основных стадии: дивергенция (анализ), трансформация (синтез), конвергенция (оценка).

Дивергенция – подготовительный этап, который включает в себя исследование проектной ситуации, сбор информации об объекте исследования. Трансформация – этап принятия решений. Конвергенция – совокупность логических и математических методов, носящих формальный характер. Это единственная стадия, которая поддается логическому анализу и может быть выполнена при помощи средств вычислительной техники.

Процесс инженерного проектирования содержит ряд этапов:

1. Изучение целей и задач: на этом этапе задача формируется в общем виде, производится дивергентный поиск, необходимый для конкретизации задачи.

2. Выбор пути решения – это этап трансформации.

3. Формирование цели: на этом этапе выбирается идея, формируется способ решения.

4. Инженерный анализ – это этап конвергенции. Его основа – создание модели, ее анализ, оптимизация, обобщение результатов.

5. Конкретизация решения для определенных условий.

Изучение процесса проектирования возможно как на физических, так и на математических моделях. Поскольку построение физических моделей связано со значительными затратами средств и времени, наиболее целесообразно исследовать процесс проектирования на математических моделях. Способы представления математических моделей весьма разнообразны. Выбор формы моделирования объекта исследования определяется рядом факторов: типом моделируемой схемы или конструкции, выбором независимых переменных, требуемой точностью, действующими факторами и т. д.

В настоящее время можно отметить следующие способы моделирования задач проектирования.

Модели элементов в виде схем замещения. Степень сложности схемы замещения и математических соотношений зависит от того, как точно моделируются процессы в реальном объекте. При возрастании требований к точности увеличивается сложность модели, что приводит к использованию машинных методов моделирования.

Цифровая модель, образующая математические соотношения, описывающие, например, связь токов и напряжений. Для расчета цифровых моделей вследствие сложности связей трудно использовать аналитические методы. В этих случаях лучше применять численные методы решения уравнения модели.

Статические и динамические модели. Статические модели отражают состояние элементов в объекте исследования и не содержат реактивных компонентов и параметров, зависящих от времени. Динамические модели отражают процессы в элементах и учитывают время.

Математическая модель – это некоторый функциональный оператор

$$F(x_1; x_2; \dots; x_n; y_1; y_2; \dots; y_n),$$

где  $x_1; x_2; \dots; x_n$  – система внутренних параметров элемента;  $y_1; y_2; \dots; y_n$  – совокупность внешних параметров элемента.

Внутренние параметры – это электрофизические или конструктивно-технологические, а внешние, как правило, токи и напряжения. Значит, чтобы задать математическую модель элемента схемы или явления, необходимо определить форму ее представления, математические зависимости, связывающие внешние и внутренние параметры, и значения внутренних параметров.

Рассмотрим основные требования к моделям, предназначенным для анализа электронных схем. Основным требованием является точность соответствия модели реальному элементу. Как правило, оценка точности производится по степени совпадения вольт-амперной характеристики модели и реального объекта исследования. Используются следующие оценки: максимальное относительное отклонение в рабочем диапазоне

$$\delta_i = \left| \frac{i_m - i_\varepsilon}{I_\varepsilon} \right|_{\text{макс}} \quad \text{или} \quad \delta = \left| \frac{U_m - U_\varepsilon}{U_\varepsilon} \right|_{\text{макс}},$$

где  $i_m, i_\varepsilon, U_m, U_\varepsilon$  – соответственно токи и напряжения вольт-амперной характеристики модели и элемента;

среднеквадратическое отклонение в рабочем диапазоне

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \left( \frac{y_{Mj} - y_{\varepsilon j}}{y_{\varepsilon j}} \right)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\delta_{yj})^2}{n}},$$

где  $n$  – число точек измерения,  $y$  – внешний параметр модели.

Требования к модели связаны с использованием их на компьютерах. Одним из таких требований является непрерывность модели (справедливость ее для всех режимов работы элементов схемы).

Для обеспечения высокой точности вычислений к моделям предъявляется требование обусловленности – возможность точного расчета аргументов модели и малое влияние ошибок этого расчета на выходные параметры модели.

Важным требованием к модели считается ее простота, так как даже при использовании компьютера усложнение модели влечет за собой увеличение времени расчета.

#### 1.4. Принципы построения размерно-параметрических рядов типовых конструкций

Конструкция ЭС – совокупность определенным образом связанных конструкционных и схемотехнических элементов и компонентов.

Основу ее классификации составляют:

- назначение (радиоприемная, телевизионная, бытовая, самолетная и т. п.), элементная база (дискретные или микроэлементы различной степени интеграции);
- физическая природа определяющего работу ЭС эффекта (электрические и магнитные поля, механические связи, тепловые и другие поля);

- важность (основная, вспомогательная), геометрия и масса (форма, размеры, объемная плотность);
- условия эксплуатации, условные иерархические уровни конструкции.

В зависимости от поставленной задачи используется та или иная классификация.

Разработка компонентов ЭС в виде элементов единых по структуре размерно-параметрических рядов (номиналы, допуски, мощности рассеивания и размеры резисторов, трансформаторов, конденсаторов, микросхем и т. п.) и относительно малые размеры компонентов по отношению к ЭС послужили основой разработки размерно-параметрических рядов типовых конструкций.

Типовая конструкция (ТК) – плоский или объемный несущий компонент размерно-параметрической ряда конструкций, используемый для размещения схемных элементов или компонентов ЭС. В простейшем случае несущий компонент – печатная плата. Возможно выполнение ТК в виде сложной трехмерной конструкции с защитным кожухом, опорными ножками или амортизаторами, встроенными системами охлаждения и другими приспособлениями. Столь широкий диапазон конструкторских решений существенно затрудняет построение размерно-параметрических рядов типовых конструкций.

Размеры сторон ТК могут изменяться по метрическому или ритмическому соотношениям, прилагаемым ко всем или части 'размеров сторон ТК. Возможно как совместное применение метрического и ритмического соотношений к размерам одной ТК, так и пропуски определенных значений.

При метрических соотношениях

$$a_n = a_0 + nm ,$$

при ритмических

$$a_n = a_0 + K_m^n ,$$

где  $a_n$  – значение  $n$ -го размера;  $a_0$  – начальное значение размера (например, ширины, высоты, глубины) данного ряда;  $n$  – целое или дробное число, лежащее в основе размерно-параметрического ряда данной ТК и определяющее диапазон изменений размеров в пределах  $a_0...a_n$ ;  $m$  – величина приращения (модуль) при метрическом соотношении;  $K_m$  – коэф-

коэффициент прогрессии ритмического соотношения, обычно в виде  $K_m = \sqrt[n]{10}$ .

Часто модулем называют любой несущий компонент ТК или готовое изделие из данного размерно-параметрического ряда, особенно если  $a_0 \neq m$ . При использовании метрического ряда проще обеспечить стыковку различных несущих компонент, но при этом общее число компонент для обеспечения заданного объема или площади получается со значительной избыточностью по сравнению с числом компонент ритмического ряда.

Факторы, определяющие выбор  $a_0$ ,  $n$ ,  $m$  и  $K_m$  конкретного размерно-параметрического ряда ТК, следующие. Выбор значений  $a_0$  для высоты, ширины и глубины ТК определяется минимальными размерами используемых компонентов или их групп, регуляторов, индикаторов, разъемов и конструктивных элементов для установки, смены и крепления ТК. Обычно значения  $a_0$  лежат в пределах 20...100 мм. Значение  $n$  изменяется в пределах 4...24. Минимальное значение характерно для измерительных приборов, максимальное – для стоечной и шкафной ЭС. Общее число возможных вариантов объема или площади элемента ТК будет равно  $n_1 n_2 n_3$  и  $n_1 n_2$ , где  $n_i$  – число значений высоты, ширины; глубины (для блоков), ширины и длины (для плат).

Поэтому рекомендуется выбирать значения  $a_0$  для высоты, ширины и глубины (или ширины и длины у плоских плат) разными, что даст возможность при минимальном количестве определяющих размеров ТК получить максимальное разнообразие значений объемов или площадей (рис. 1.4).

Методы конструирования ЭС по мере развития микроэлектроники претерпевали коренные изменения. При конструировании ЭС первого и второго поколений разработчики старались использовать в схемах минимально возможное количество ЭРЭ, особенно таких как лампы и транзисторы, из-за их относительно высокой стоимости и габаритов и понижения надежности ЭС по мере увеличения количества ЭРЭ. Ввиду относительно большой массы и объема ЭРЭ увеличение их числа в ЭС первого и второго поколений быстро увеличивало общую массу и габариты.

При конструировании ЭС третьего и четвертого поколений (которую иногда называют микроэлектронной аппаратурой МЭА) сформировался

иной подход к конструированию, суть которого в использовании ИС возможно большей степени интеграции. Это объясняется тем, что ЭРЭ (в том числе и активные), входящие в состав ИС, намного дешевле и меньше по размерам дискретных аналогов, что позволяет существенно повысить надежность ЭС, уменьшить массу и габариты.

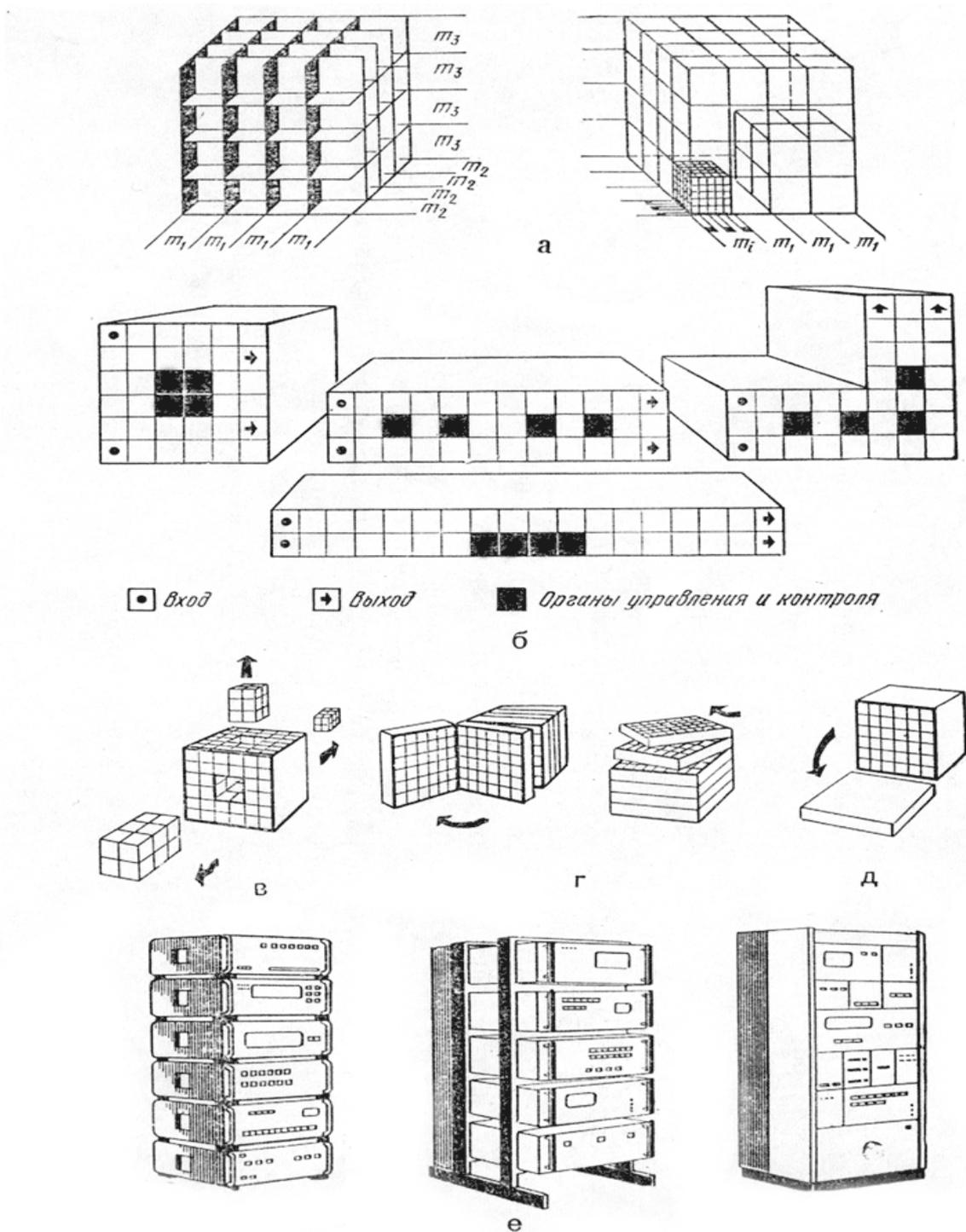


Рис. 1.4. Структура типовой конструкции

Схематически модульную структуру ТК можно представить так (рис. 1.5, а): заданное пространство расчленяется на модули с размерами сторон по ширине, глубине и высоте  $m_1, m_2, m_3$ . Минимальный размер модуля  $m_1$  определяется необходимостью размещения в нем по ширине (глубине, высоте) заданного количества компонентов размером  $m_i$ .

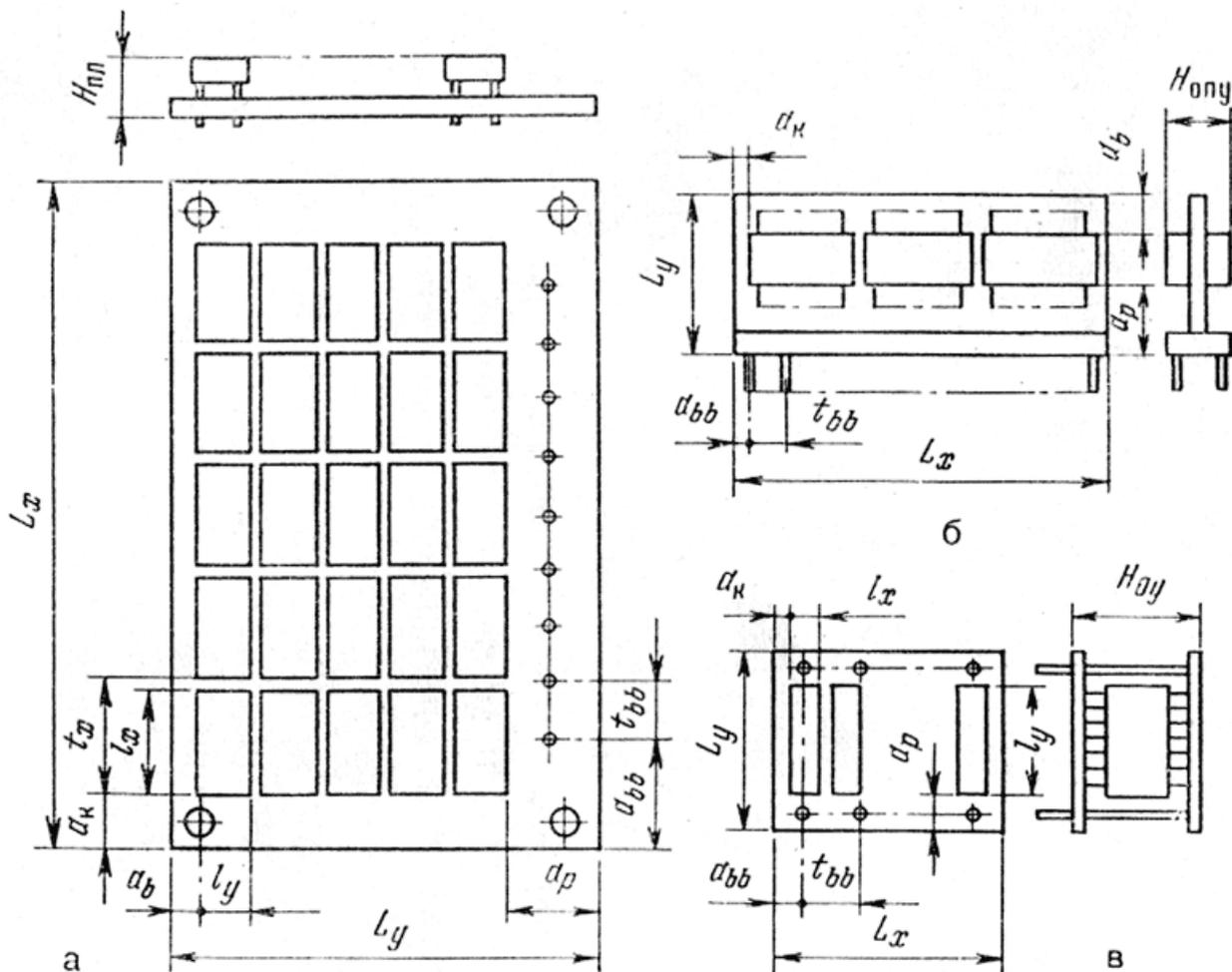


Рис. 1.5. Бескаркасная ЭС

Компоновочные структуры первой и второй групп применяются при конструировании массовой бытовой и лабораторной ЭС, а также аппаратуры, для которой требования по габаритам и надежности не являются жесткими. Структуры третьего и четвертого типов применяются при конструировании ЭС, к которой предъявляются повышенные требования по надежности и габаритам.

**Таблица 1.1. Особенности конструкций ЭС 3-го и 4-го поколений,  
выполненных на ИС и МС**

Параметр	Группа ЭС			
	1	2	3	4
Степень интеграции	1...2	3...4	2...3	3,4
Плотность компоновки	0,12	0,33	0,75	1
Наличие корпуса ИС, МС	Да	Да	Нет	Нет
Наличие корпуса ЭС: с уплотнением (герметичного)	Да (Да)	Да (Да)	Нет (Да)	Нет (Да)
Объем	16	5,3	2	1
Сложность конструкции	13	4	2	1
Число слоев ПП или МПП	2; 4	4	2; 4	4

Примечания:

1. Плотность компоновки, объем и сложность конструкции даны в относительных единицах.

2. ЭС 1-й и 2-й групп имеет на ПП разъем и армировку, 3-й группы – печатный разъем, 4-й группы – без разъема.

3. В качестве элементной базы в ЭС 1-й и 2-й групп используются полупроводниковые или гибридные ИС, в 3-й – бескорпусные гибридные ИС, транзисторы и простейшие диодные матрицы, в 4-й – полупроводниковые или гибридные ИС и активные элементы в виде бескорпусных полупроводниковых ИС2 и ИС3 на общей теплоотводящей плате в виде своеобразной «непрерывной микросхемы».

Исходное значение плотности компоновки для четвертой группы равно  $15 \text{ см}^{-3}$ . Анализ данных показывает, что конструкция ЭС на ИС и МС упрощается с ростом плотности компоновки.

Конструктивной единицей ЭС на ИС и МС является функциональная ячейка (ФЯ) с каркасом или без него. Бескаркасные ФЯ представляют собой обычные ПП или МПП и применяются в аппаратуре, к которой не предъявляются жесткие требования в отношении механической прочности (рис.1.5). В каркасных конструкциях несущим элементом служит металлическая рамка, она же является теплоотводом. Каркасные конструкции могут иметь одностороннюю (рис. 1.6), двухстороннюю

и сдвоенную компоновочные схемы. ФЯ могут включать зону расположения навесных ЭРЭ.

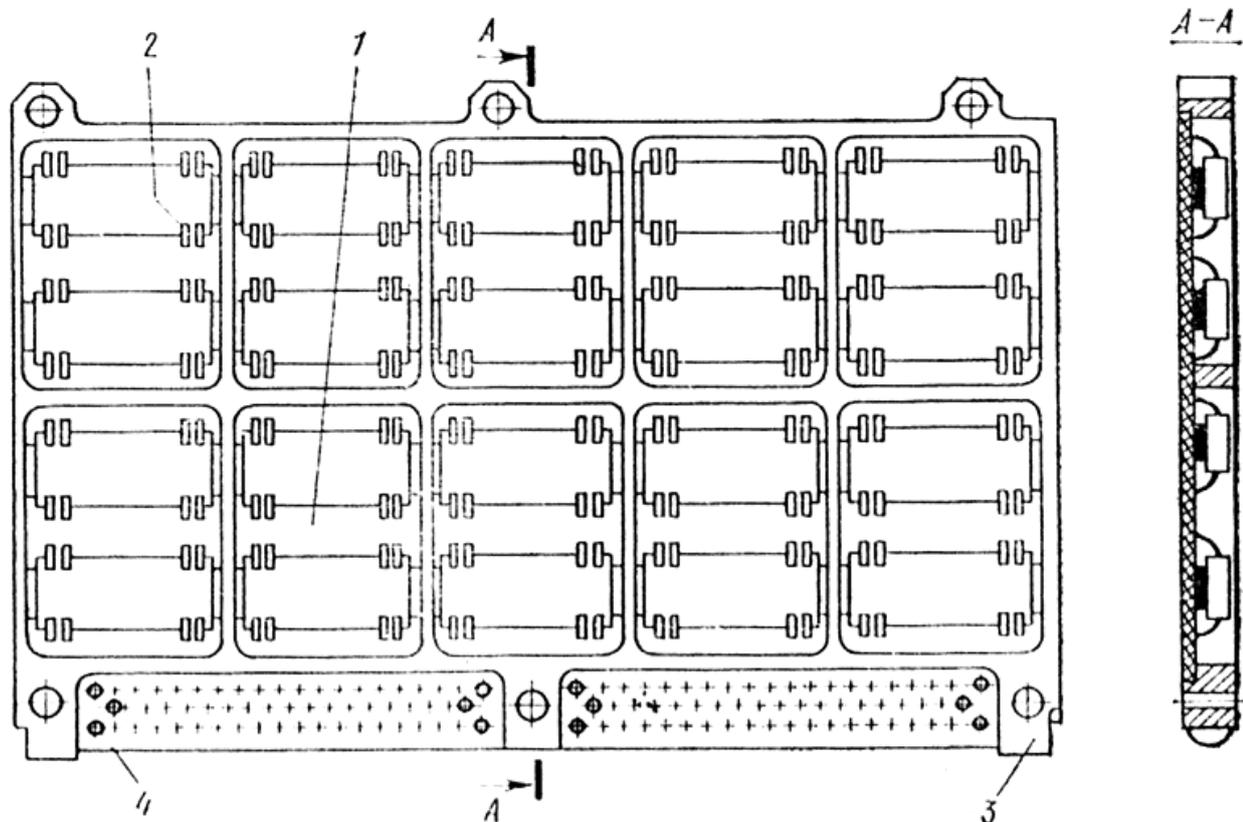


Рис. 1.6. Каркасная конструкция:

1 – ситалловая подложка, 2 – ЭРЭ, 3 – металлическая рамка, 4 – печатная плата

Несущая рамка с теплоотводами 3 (рис. 1.6) выполнена из алюминиевого сплава и имеет сквозные отверстия для зон межмикросхемной коммутации и зоны выходных отверстий или контактов.

В центральной зоне рамки к ее продольным планкам-теплоотводам с помощью демпфирующего теплоотводящего компаунда крепят бескорпусные гибридные ИС. Они выполняются на ситалловых подложках с навесными бескорпусными ЭРЭ. С противоположной по отношению к ИС стороны к планкам-теплоотводам рамки через изолирующую прокладку с помощью клея крепится ПП. Электрическое соединение периферийных контактных площадок гибридной ИС с контактными площадками ПП осуществляется с помощью золотых перемычек диаметром 30...50 мкм или золоченых медных полосок шириной 300 и толщиной 20 мкм.

В блоках аппаратуры групп 1 и 2 (таблица 1.1) ФЯ соединяются между собой по известным компоновочным схемам типа «сэндвич», «кассета»

и т. п. При соединении ФЯ группы 3 и 4 оптимальной является «книжная» конструкция. До стягивания ФЯ в пакет винтом они могут разворачиваться подобно листам книги, этим достигается легкий доступ к любому элементу конструкции при контроле и ремонте. ФЯ соединяются с помощью гибкого печатного кабеля. Последовательное сложение ячеек в «книжку» образует пакет, который помещается в герметичный кожух и укрепляется в нем стяжными винтами.

Рассмотренные компоновочные схемы ФЯ и блоков являются наиболее эффективными, так как принципы их построения базируются на типовых, унифицированных элементах конструкции. Так, для ФЯ можно унифицировать габаритно-установочные размеры, шаг и размеры контактных площадок ПП, классы точности и чистоты обработки определяющих размеров и поверхностей. Типовая компоновка и монтаж ФЯ и блоков, унификация их типоразмеров, принципов размещения ИС и МС повышают их эксплуатационную надежность и взаимозаменяемость, снижают трудоемкость сборки, контроля и регулировки.

*Конструкции микросборок* представляют собой функционально законченные изделия, они могут быть в корпусе или без него. Корпуса МС должны соответствовать ГОСТ 17467—78. Бескорпусные МС герметизируются в составе узлов и блоков, выполняются они, как правило, по гибридно-пленочной технологии с использованием активных и пассивных элементов и (или) бескорпусных полупроводниковых ИС, размещаемых на керамических или ситалловых подложках. Предпочтительные размеры подложек:

60X48, 60X24, 60X16, 48x30, 48X20, 48X15,  
36X24, 30X24, 30X16, 24X20, 20X15 мм.

Высота бескорпусных МС не превышает 5 мм. Размеры подложек МС, устанавливаемых в корпуса, определяются размерами монтажных площадок корпусов.

Внешними выводами бескорпусных МС могут служить проволоочки, балочки, штыри или лепестки, соединяемые с контактными площадками, металлизированными отверстиями или пазами подложек (рис. 1.7). Выводы, контактные площадки, отверстия или пазы размещаются по краям подложек в соответствии с шагом координатной сетки ПП.

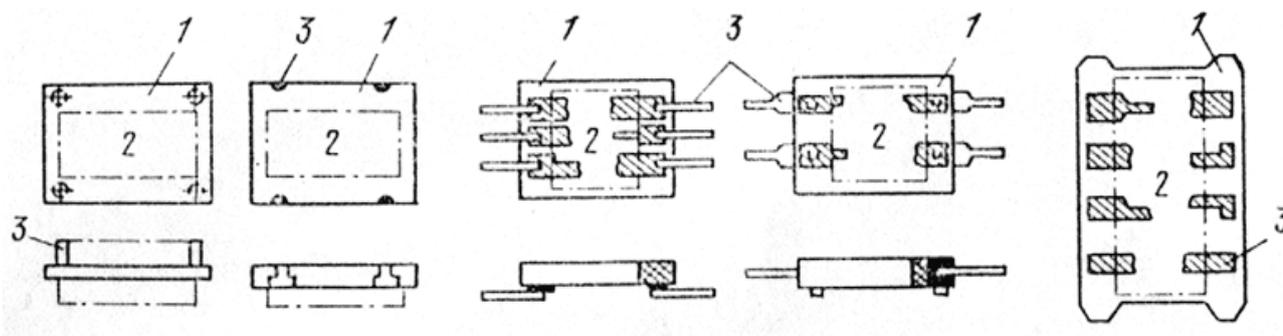


Рис. 1.7. Схемы конструкций бескорпусных МС:

1 – подложка; 2 – зона расположения компонентов МС; 3 – выводы МС

Компоненты МС закрепляют на подложках клеем или пайкой с использованием методов защиты от воздействия статического электричества. Конструкция МС не должна допускать локальных перегревов элементов и компонентов, элементы и компоненты с температурными ограничениями нельзя располагать вблизи источников тепловыделений. Для повышения допустимой мощности рассеяния бескорпусные МС монтируют на теплоотводящих металлических шинах, являющихся частью несущей конструкции узла, либо на тепловых трубках.

Чтобы улучшить технологичность конструкций, рекомендуется применять минимальное количество типоразмеров подложек, а для соединения МС с общей ПП узла использовать плоские печатные кабели. Установка, формовка выводов и монтаж компонентов на подложке должны производиться в соответствии с требованиями ТУ. Если механическая прочность обеспечивается пайкой, клей можно не применять. На рис. 1.8 приведены примеры установки и монтажа некоторых компонентов на подложке МС. Правила конструирования МС установлены ОСТ4 ГО.010.043 «Микросборки. Установка бескорпусных элементов и микросхем. Конструирование».

*Принципы создания высоконадежных средств.* Применение полупроводниковых ИС высокой степени интеграции позволило резко увеличить надежность узлов и блоков ЭС, появилась возможность создавать устройства, обладающие адаптивностью по отношению к внешним эксплуатационным факторам.

Жесткие требования к стабильности электрических параметров в различных условиях эксплуатации накладывают ограничения на допусти-

мые изменения напряжения питания, передаточные характеристики, диапазон рабочих температур. Требования высокой надежности работы ЭС при аномальных изменениях входных сигналов или нагрузки заставляют вводить дополнительные цепи защиты от этих воздействий.

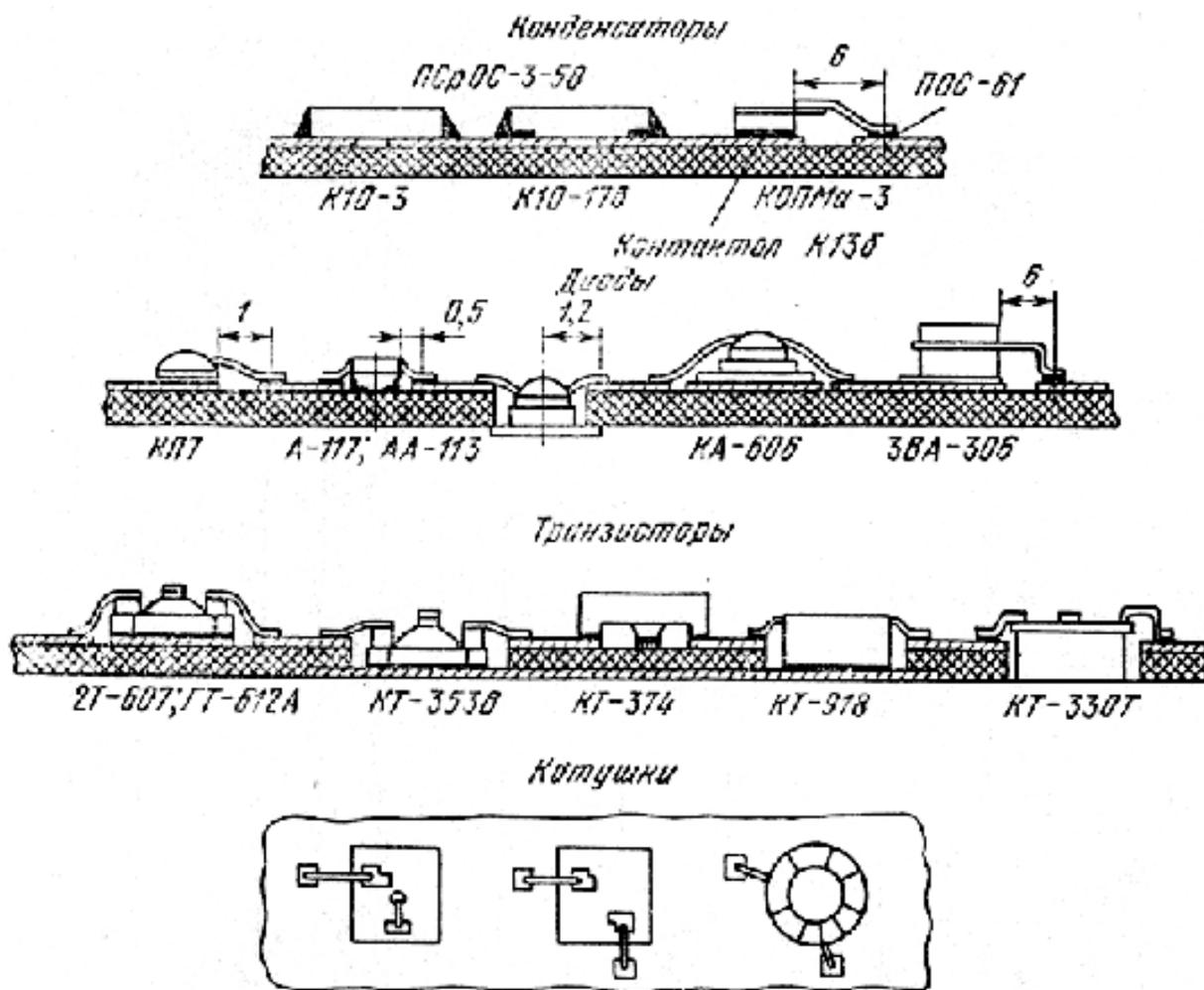


Рис. 1.8. Варианты монтажа компонентов МС

Преимущества использования бескорпусных ИС и МС позволят по-новому решить проблемы создания ЭС высокой надежности. Схемы стабилизаторов напряжения и тока, регуляторы температуры подложки, различные корректирующие и управляющие цепи, защитные элементы можно изготавливать на том же основании ИС или МС, на котором расположена основная схема, без существенного увеличения размеров кристалла или подложки.

Поэтому представляется целесообразным использовать новые возможности микроэлектронной технологии не только для разработки ИС

или МС с улучшенными электрическими параметрами по отношению к выпускаемым (например, меньшая потребляемая мощность, большее быстродействие и т. д.), а создавать принципиально новый класс ИС и МС, надежность которых будет на несколько порядков выше, чем у современных.

### 1.5. Типовые конструкции ЭС

В зависимости от степени сложности ТК можно разделить на три конструктивных уровня: I— элементная база (конструктивно и технологически неделимая совокупность материалов), II – типовые компоненты (совокупность ТК 1 уровня и электрических и механических элементов, имеющая самостоятельное функциональное назначение), III – конструкция ЭС в целом (совокупность схемно- и конструктивно-технологических 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  $uz$ . В комплектном блоке соединение осуществляют рамой  $xu$ . Для стойки характерна одна рама  $uz$ , 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. При отсутствии их элементы отдельных уровней могут выпадать из структуры (табл. 1.2).

*Размерная система.* Размерная преемственность для несущих конструкций ЭС и ее аналогов отражена в отечественных стандартах, нормах ведущих фирм, где даны ряды размеров и их сочетаний. В основу размерной преемственности ТК корпусов ЭС положен модуль с размером 20 мм.

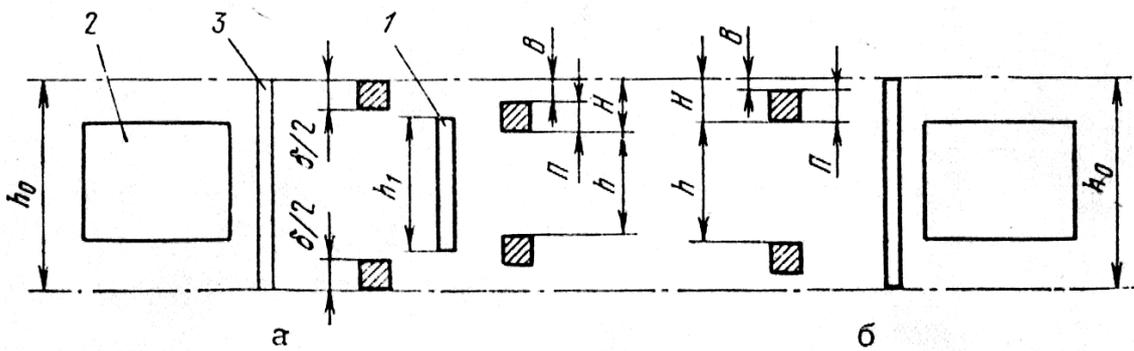


Рис. 1.9. Схема полей допусков при системе вала (а) и широкоходовой посадке(б):

$h_0$  - расчетный размер,  $h_1$  - минимальный размер,

$h$  - номинал с полем допуска  $\Pi = H - V$

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. 1.9).

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».

Таким образом, не удастся построить размерную основу, общую для всех ТК, а это затрудняет межведомственную кооперацию в разработках, увеличивает сроки проектирования ЭС.

*Конструктивно-технологическое исполнение.* Для изготовления несущих элементов ТК используют листовую сталь, штампованные стальные профили, алюминиевые листы, пресованные профили и литые детали.

Таблица 1.2. Характер структурной иерархии ТК

Элемент ТК	Расположение направляющих	Возможное размерное развитие	Состав элемента ТК
Каркас блока частичного	Сверху и (или) снизу	По ширине лицевой панели	ПП, МПП, ТЭЗ
Каркас блока комплектного	Сбоку	По высоте лицевой панели	ПП, МПП, ТЭЗ, блоки частичные
Каркас блочный переходной	Сбоку	По высоте лицевой панели	Блоки частичные установкой
Корпус стойки	Сбоку	По высоте стойки	ТК в стойку и пульт
			Блоки комплектные и блоки частичные (в каркасах блочных переходных)
Корпус пульта	Сбоку (сверху и снизу)	По высоте и ширине пульта	То же

При выборе материалов и конструкции несущего элемента ТК следует тщательно проанализировать их преимущества и недостатки, а также учесть производственные и технологические возможности предприятия-изготовителя. Основные характеристики несущих конструкций, применяемых в различного вида ЭС, приведены в табл. 1.3. На рис. 1.10 даны примеры конкретных конструкций.

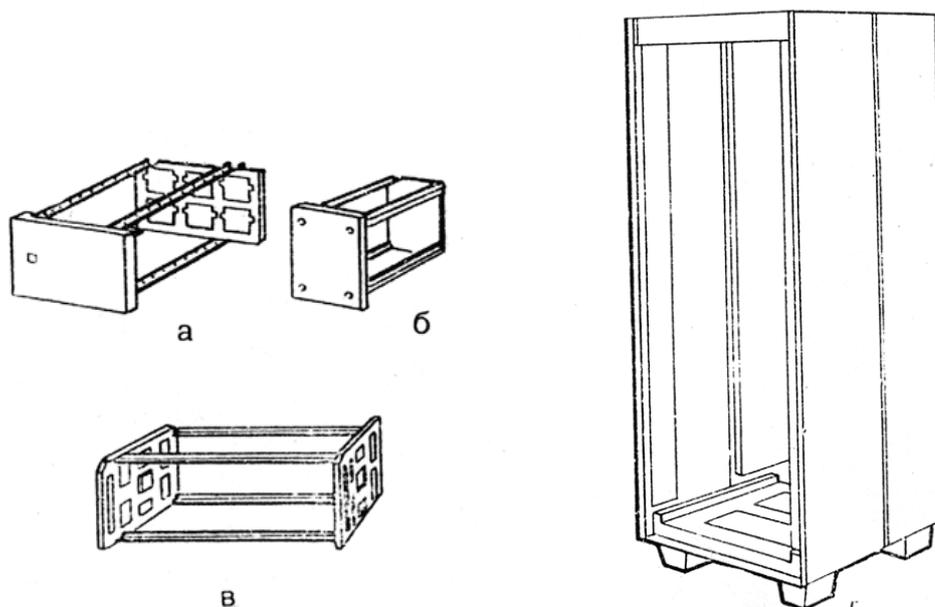


Рис. 1.10. Каркас частичного блока из листовых штампованных элементов (а) и из алюминиевых профилей (б), каркас настольного прибора из алюминиевых профилей и литых стенок (в), бескаркасная стопка из листовой стали и литого основания (г)

Таблица 1.3. Основные характеристики несущих элементов ТК ЭС

Конструктивно-технологическое решение	Характеристика, эффективность	Недостатки	Применение
Каркас и корпус из листов стали, гнутый профиль, сварка. Бескаркасные конструкции	Высокая жесткость и прочность конструкции, точность размеров, хорошее качество поверхностей, хорошая экранировка электрических цепей и надежное заземление металлических частей, низкий удельный вес сборочных работ	Необходимость специального оборудования (гибочные прессы, сварочные агрегаты)	Крупногабаритные стопки, встраиваемые блоки, настольные приборы (мелкосерийное производство)
Каркас из алюминиевых профилей, стенки и крышки из листового стали или листового алюминия	Высокие эстетические характеристики, простота конструкции, достаточная прочность для небольших и средних размеров конструкций, отсутствие необходимости в специальном оборудовании при изготовлении конструкций	Недостаточная жесткость больших конструкций (стоек, шкафов), большая доля сборочных работ (винтовые соединения), плохое заземление металлических частей, ненадежность соединений при транспортировке	Преимущественно настольные приборы, встраиваемые блоки (мелкосерийное и серийное производство)
Корпус из литых алюминиевых частей и алюминиевых профилей	Высокие эстетические характеристики, точность размеров, достаточная жесткость, экономичность конструкции	Плохое заземление металлических частей, необходимость специального литейного оборудования	Настольные приборы, основания стоек, вставные блоки (серийное производство)

## 1.6. Универсальные типовые конструкции ЭС

Стандартизация конструкций ЭС, развитие модульной техники, ограничение рядов типоразмеров компонентов конструкций, ориентация на современные методы конструирования, достижения микроэлектроники и прогрессивные технологические процессы позволили создать единую конструктивную базу ЭС – комплекс УТК, совместимый с автоматизированными методами проектирования и изготовления ЭС. Комплекс УТК в зависимости от условий эксплуатации и конструктивно-технологических особенностей ЭС, в которой применяются эти конструкции, можно подразделить на следующие три класса:

- УТК-I – стационарная ЭС, предназначенная для работы в отапливаемых и неотапливаемых помещениях (категории 3 и 4 по ГОСТ 15150—69);
- УТК-II – стационарная, полустационарная и подвижная ЭС, работающая на открытом воздухе, во временных помещениях и укрытиях, палатках, на колесном и гусеничном транспорте (категории I и 2 по ГОСТ 15150—69 и 4 и 6 по ГОСТ 16019-78);
- УТК-III – ЭС на НС и МС, устанавливаемая на подвижных объектах в труднодоступных местах и работающая на ходу в жестких условиях эксплуатации. Таким образом, каждый класс УТК предназначен для ЭС, работающей в одинаковых или сходных условиях эксплуатации.

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

КУ – 0: бескорпусные активные и пассивные микроэлементы в виде полупроводниковых транзисторов, диодов, диодных матриц, интегральных схем различной степени интеграции, пленочных резисторов и конденсаторов (табл. 1.4);

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 ЭС, разрабатываемой на базе УТК-1 и УТК-11, ТЭК для ЭС, разрабатываемой на базе УТК-111;

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

КУ – 4: несущие конструкции стоек, шкафов, пультов управления, распределительных щитов, приборных корпусов для ЭС, разрабатываемой на базе УТК-III;

УТК-1 и УТК-II и несущие конструкции агрегатированных систем и подсистем малогабаритной и микроминиатюрной ЭС, разрабатываемой на базе УТК-III.

Таблица 1.4. **Бескорпусная элементная база**

Тип элемента	Размеры кристалла $I \times b \times h$	Монтажная площадь, мм <sup>2</sup>	Выходы
Интегральные микросхемы			
Серия 129	1,7×1,2×0,8	5,3	6-П
Серия 703	1,8×1,8×0,8	3,24	14-Ш
Серия 734	1,8×1,8×0,8	13,8	14-П
Серия 739	1,45×1,45×0,8	2,25	8-Ш
Серия 740	1,55×1,55×0,8	11,7	8-П
Серия 756	1,6×1,6×0,8	2,56	14-Ш
Серия 775	1,5×1,5×0,8	2,25	8-Ш
Транзисторы			
2Т202	1×1×0,8	3,3	3-П
2Т307	0,75×0,75×0,8	2,5	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
2П201	1,2×1,2×0,8	4,8	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 – проводные, Ш – шариковые.

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

Классы УТК – I и УТК – II имеют единую номенклатуру и общее конструктивное исполнение компонентов, что обеспечивает преемственность и взаимозаменяемость конструкций на уровне печатного узла и частично блока (рис. 1.11).

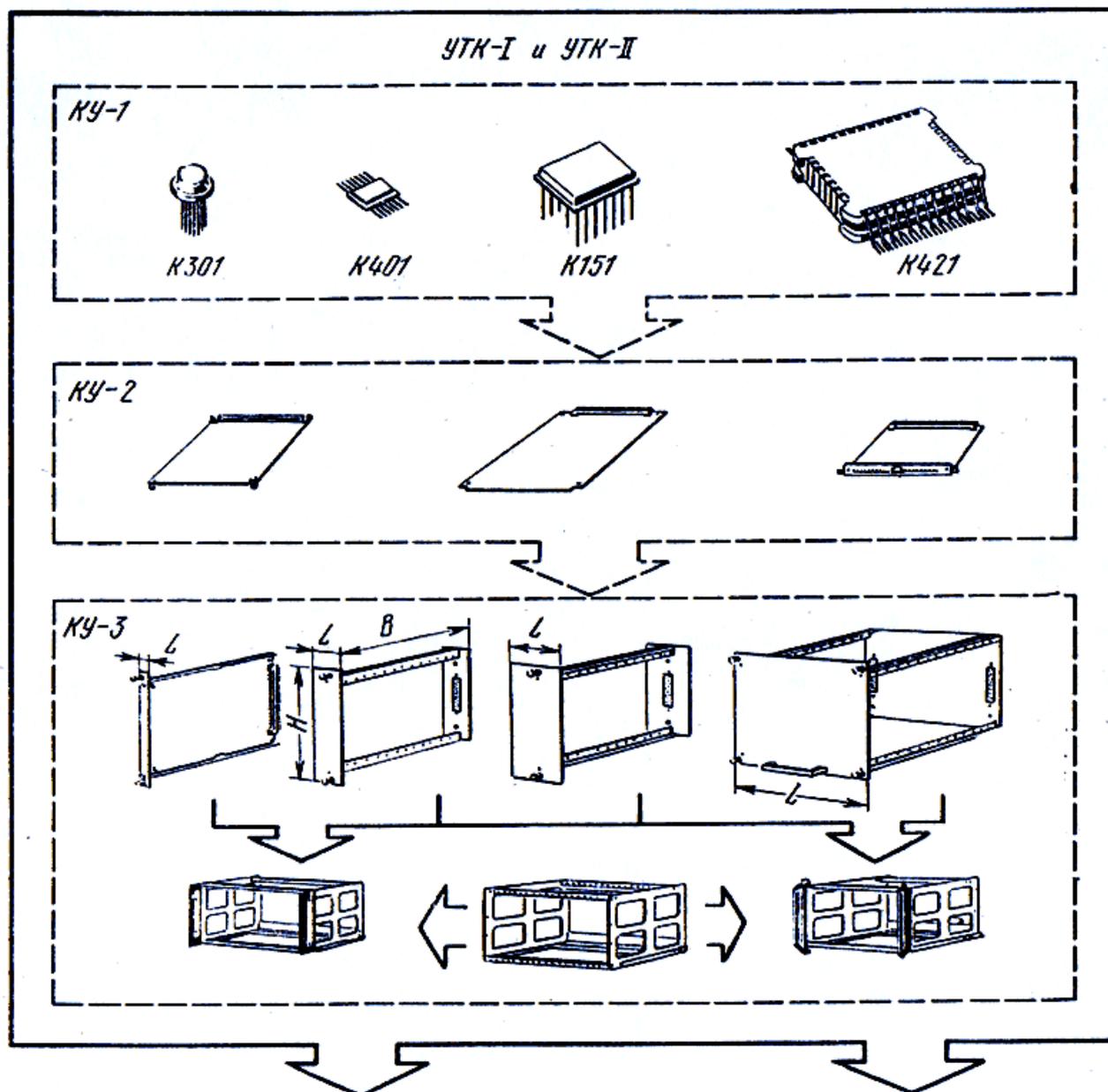


Рис. 1.11. Структура УТК

Структура и состав УТК-III отличаются от УТК-1 и УТК-II широким применением бескорпусной элементной базы (микроминиатюризация и надежность), т. е. введением нулевого КУ.

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

### **1.7. Конструктивно-технологические особенности современных ЭС**

Структура технологического процесса изготовления радиоэлектронной аппаратуры во многом определяется ее конструктивно-технологическими особенностями. Анализ конструкции современной аппаратуры позволяет выявить общие тенденции конструирования, обобщить конструктивные решения с целью формулирования обобщенного технологического процесса изготовления радиоэлектронной аппаратуры.

Введение обобщенного технологического процесса в курс «Технология ЭС» формирует его научные основы, позволяет разрабатывать математические модели процесса, проводить анализ и синтез процесса с оптимизацией его параметров.

Конструкция радиоэлектронной аппаратуры за годы ее развития претерпела значительные изменения.

Сравнительно несложная в первые годы аппаратура представляла собой единую монолитную конструкцию – моноблок. С ростом сложности аппаратура стала конструктивно расчленяться на отдельные части, выполняющие самостоятельные функции,— блоки. Блочный метод позволил унифицировать производство благодаря специализации и параллельной работе отдельных участков.

Дальнейшее развитие характерно делением на еще более мелкие части – субблоки и узлы. Их появление привело к разработке нового метода конструирования радиоаппаратуры – функционально-узлового метода.

Сущность функционально-узлового метода состоит в расчленении аппаратуры на отдельные простые, по функционально законченные небольшие узлы, которые могут быть отдельно настроены и проверены. Преимущества этого метода состоят в том, что каждый узел можно заранее отработать, если речь идет о разработке аппаратуры, или заранее настроить и испытать, если речь идет об ее изготовлении; и в том, и в другом случае достигается высокая степень отработки и надежность узлов и аппаратуры в целом.

При этом сокращается время на разработку аппаратуры, появляется возможность специализации разработчиков и производства, упрощается эксплуатация и ремонт аппаратуры, как принято говорить, повышается ее ремонтпригодность.

Плата функционального узла (рис. 1.12) выполнена из фольгированного стеклотекстолита толщиной 1,5 мм.



Рис. 1.12. Функциональный узел

На плате расположено двенадцать выводов, с помощью которых узел электрически и механически соединяется с платой субблока. Расчленение аппаратуры позволяет расчленить и технологический процесс ее изготовления. Расчленение технологического процесса изготовления аппаратуры на отдельные частные процессы позволяет механизировать изготовление типовых элементов – печатных плат, модулей и т. п. Введение субблоков, законченных конструктивно и функционально, позволяет значительно упростить общую сборку изделий и их регулировку.

Нормированные геометрические размеры типовых узлов позволяют создать универсальную оснастку для изготовления различных по назначению узлов, что сокращает сроки подготовки производства при разработке новых изделий.

Функциональные узлы, унифицированные по конструкции, технологии и питающим напряжениям, получили название унифицированных функциональных узлов (УФУ) или модулей, а сам метод – модульного метода конструирования.

Унифицированные конструктивные размеры модулей, сетка монтажа и технология позволяют механизировать и автоматизировать их производство.

По способу расположения радиоэлементов и конструктивному исполнению модули можно классифицировать на три группы:

- 1) плоскостные (ПМ) с расположением радиоэлементов на плоскости диэлектрической платы (рис. 1.13);
- 2) объемные (ОМ) с расположением радиоэлементов между двумя диэлектрическими платами (рис. 1.14);
- 3) объемно – плоскостные (ОП) с расположением радиоэлементов на плоскости плат, которые затем собираются в объемную конструкцию (рис. 1.15).

Каждый из приведенных модулей обладает своими значениями: надежности; коэффициента заполнения объема (количества элементов в см); технологичности; ремонтпригодности; стоимости. Эти показатели находятся в тесной взаимосвязи и часто, удовлетворяя одни требования, жертвуют другими.

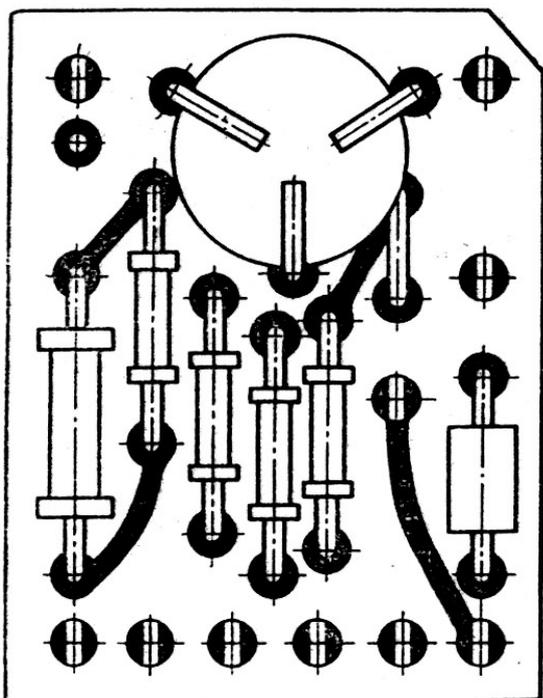


Рис. 1.13. Плоскостной модуль

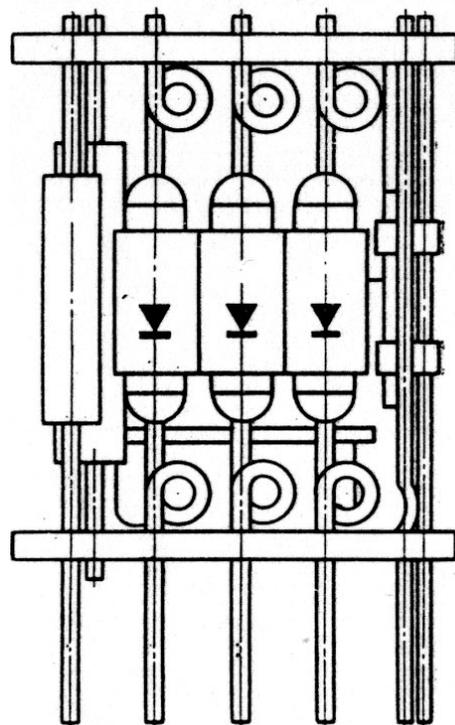


Рис. 1.14. Объемный модуль

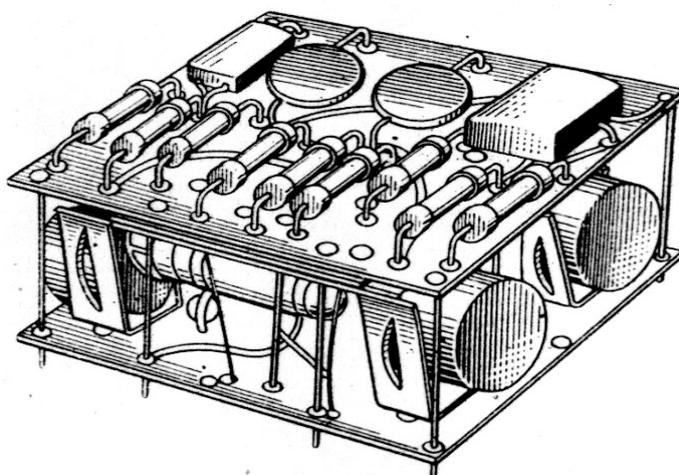


Рис. 1.15. Объемно-плоскостной модуль

Преимущества модульного метода конструирования в свое время обеспечили ему быстрое распространение и широкое внедрение. Были разработаны унифицированные функциональные узлы широкого применения и организовано их централизованное производство. Метод получил всеобщее признание.

Пример конструкции блока на плоских модулях показан на рис. 1.16, а сам модуль — на рис. 1.17.

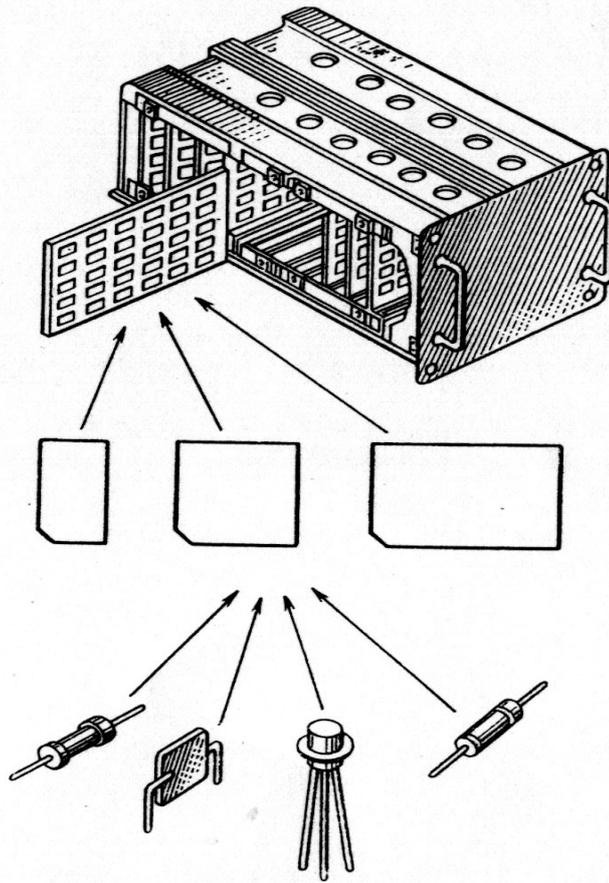


Рис. 1.16 Структура радиоэлектронного блока на УФУ

Модули на рис. 1.17 представляют собой плоскостную конструкцию и отличаются от объемно-плоскостной и объемной конструкции большей простотой и технологичностью.

Схемные элементы расположены на одной стороне печатной платы, что позволяет производить механизированную сборку и пайку узлов.

Модули имеют проволочные выводы, которыми они впаиваются в печатные платы, обеспечивая одновременно электрические соединения и механическое крепление узлов. Печатную плату делают из стеклотекстолита толщиной 1,5 мм, а контактные выводы выполняют из медной серебряной проволоки диаметром 1 мм, элементы схемы устанавливают с шагом 4 мм и запаивают в металлизированные отверстия печатной платы. Коэффициент заполнения объема 0,5—2 детали в 1 см<sup>3</sup>.

Применение модульного метода конструирования ускоряет и упрощает процесс проектирования аппаратуры. Разработчик при этом оперирует не с отдельными радиоэлементами, а с готовыми функциональными узлами и не тратит времени на их отработку.

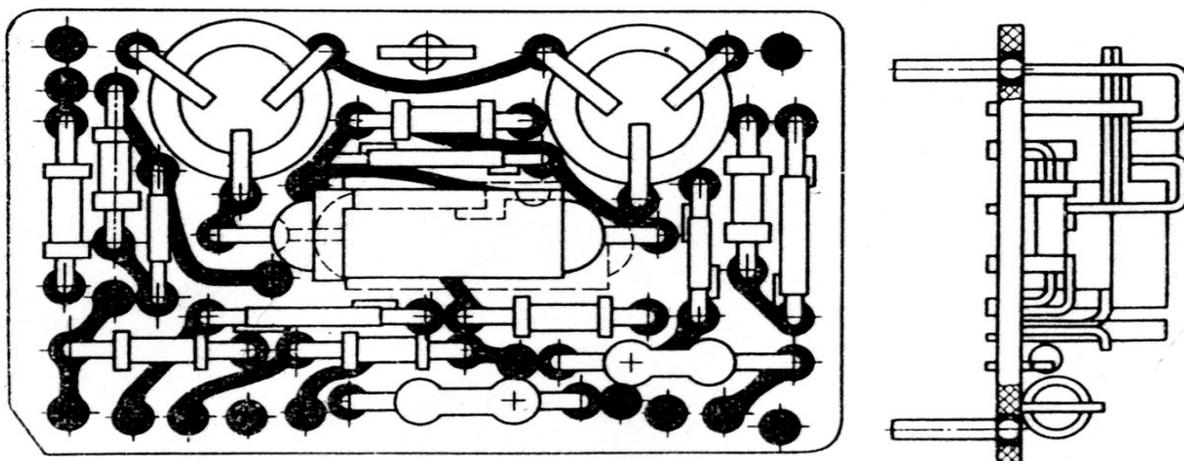


Рис. 1.17. Унифицированный функциональный узел (УФУ)

Процесс макетирования схем блоков можно производить одновременно с разработкой их конструкции. Изготовление блоков упрощается за счет использования уже готовых модулей. Сборочно-монтажные работы упрощаются. Меняется сам характер производства. Оно становится механизированным и автоматизированным. Период подготовки производства и освоения в производстве нового изделия сокращается за счет однотипности конструкций и технологии. Сами изделия становятся более надежными благодаря тщательной предварительной отработке (в период разработки), отладке и тренировке (при изготовлении) модулей до их использования в блоке. Повышается качество изделий. В процессе своего развития модульный метод конструирования претерпевал изменения, соответствующие прогрессу в развитии радиоэлементов. Радиоэлементы уменьшались в размерах, радиолампы уступили место полупроводниковым приборам. Уменьшились в размерах и модули, а с появлением микроэлементов появились и микромодули.

Микромодули – это модули, собранные из микроэлементов. Микромодули, аналогичные по конструкции плоскостным модулям, получили название плоских микромодулей. Однако появление микроэлементов позволило создать принципиально новую конструкцию микромодулей, похожую на этажерку. Микроэлементы закрепляются на стандартного размера диэлектрических платах, которые собираются в виде этажерки и соединяются вертикальными проводниками между собой в соответствии со схемой. Готовая конструкция герметизируется опрессовкой в компаунд. Примеры микроэлементов для этажерочных микромодулей и самих эта-

жерочных микромодулей приведены на рис. 1.18. На каждой микроплате расположен один или несколько микроэлементов.

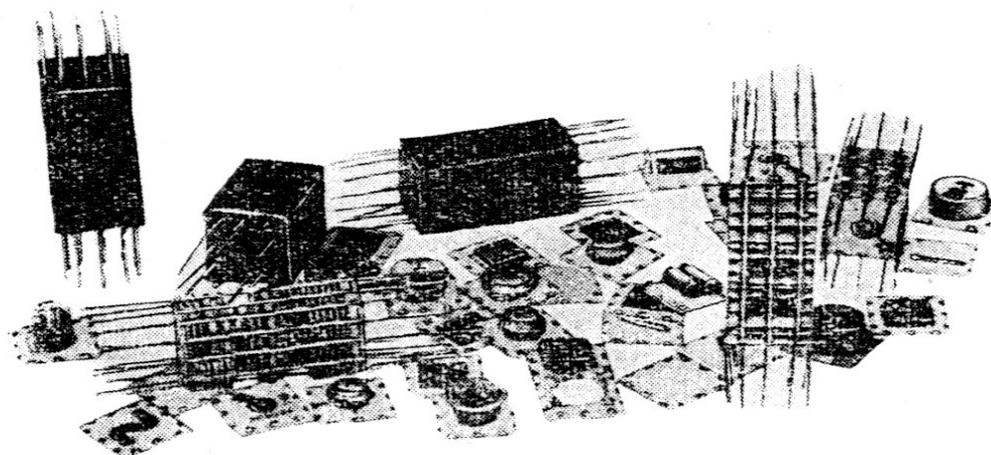


Рис. 1.18. Микроэлементы и этажерочные микромодули

Если на каждой плате по одному микроэлементу, то микромодуль называется моноэлементным, а при размещении на каждой микроплате по несколько микроэлементов (по 2...3, а иногда более) микромодуль называется полиэлементным. Применение моноэлементных микромодулей позволяет получить плотность заполнения объема аппаратуры 5...10 элементов в  $1 \text{ см}^3$ . При полиэлементных – она возрастает до 10...20 элементов в  $\text{см}^3$ .

Конструкция микромодулей обеспечивает их высокую механическую прочность и хорошую защиту от воздействий окружающей среды. Технология изготовления микромодулей привела к разработке и внедрению новых процессов, поскольку малые размеры элементов и плотность монтажа вносят свою специфику. Конструктивная форма микромодулей позволяет хорошо компоновать из них субблоки и блоки.

Каждая малая плата, в свою очередь, состоит из четырех этажерочных микромодулей. Несущим элементом конструкции блока является рама, выполненная из легкого сплава. Малые платы с распаянными на них микромодулями устанавливаются на специальном каркасе, выполненном из пеноматериала. Малая плата с четырьмя микромодулями представляет собой первичный элемент схемы и конструкции. Платы выполнены из фольгированного стеклотекстолита с последующей металлизацией отверстий.

Все элементы устройства: блоки, субблоки, малые платы, микромодули – функционально конструктивно закончены и поэтому могут изготавливаться и настраиваться на отдельном участке и поставляться на общую сборку как готовые законченные изделия, не требующие доработок. Все узлы собираются из деталей, имеющих простейшую конфигурацию, позволяющую механизировать и автоматизировать их изготовление. Широкое применение печатного монтажа позволяет механизировать процессы сборки и пайки.

В устройстве в качестве силовых элементов конструкции каркасов широко применены узлы, выполненные из пеноматериалов. Коммутационные соединения панелей в аппаратуре осуществляются с помощью фольгированной лавсановой пленки, позволяющей производить раскрытие панелей при проведении ремонтных и регламентных работ. Схемно микромодули принципиально не отличаются от модулей на полупроводниках и не требуют существенной переподготовки разработчиков и настройщиков.

Несмотря на очевидное отличие моноблочных, блочных, модульных и микромодульных конструкций друг от друга, все они обладают одной общей особенностью – они все построены на дискретных элементах. Использование дискретных элементов позволяет достичь плотности заполнения объема до 20 элементов в  $1 \text{ см}^3$ . При современной сложности аппаратуры этого уже недостаточно. Дальнейшим развитием был переход от дискретных элементов к интегральным схемам. В этом случае уже говорят не о миниатюризации, а о микроминиатюризации аппаратуры.

Интегральными схемами называют микросхемы, представляющие собой группу (сумму или интеграл) элементов, выполненных неотъемлемо друг от друга на одной подложке (на ее поверхности или объеме).

Интегральные схемы делятся на три основные группы:

1) интегральные пленочные схемы или просто пленочные схемы, в которых все элементы и соединения между ними выполнены методами пленочной технологии на общем твердом диэлектрическом основании;

2) интегральные полупроводниковые схемы или просто полупроводниковые схемы, в которых все входящие элементы выполнены методами полупроводниковой технологии на общей полупроводниковой подложке;

3) интегральные гибридные схемы или просто гибридные схемы, в которых наряду с пленочными элементами и соединениями между ними на диэлектрической подложке используются также отдельные дискретные элементы и целые схемы, изготовленные отдельно методами полупроводниковой технологии.

Применение интегральных схем позволяет резко увеличить плотность заполнения объема аппаратуры. Например:

- пленочные схемы – 50 -:-100 элементов в  $1 \text{ см}^3$ ;
- полупроводниковые – 500 -:- 1000 элементов в  $1 \text{ см}^3$ ;
- гибридные – до нескольких сотен.

Плотность заполнения объема меняется в зависимости от количества элементов в одной микросхеме или, как принято говорить, от степени интеграции. Чем выше степень интеграции, тем выше плотность.

Степень интеграции обычно колеблется от 10...20 элементов до нескольких сотен элементов в одной схеме. С увеличением степени интеграции падает процент выхода годных схем при их производстве. Кроме того, чем больше степень интеграции, тем большая требуется их надежность, так как при выходе одного элемента бракуется вся схема (как правило). Для схем разной сложности эта зависимость разная. В среднем принято считать, что при современном уровне производства оптимальной степенью интеграции является несколько сотен элементов в одной схеме. С совершенствованием процесса производства она растет.

Возможности каждого из видов интегральных схем с точки зрения создания тех или иных узлов и блоков аппаратуры различные. Каждый из трех видов имеет свои преимущества и свои недостатки, у каждого из них имеются свои принципиальные ограничения. Поэтому наиболее распространены гибридные схемы, позволяющие комбинировать эти свойства.

Метод конструирования аппаратуры на интегральных схемах тоже модульный, только модули здесь – интегральные схемы. Поэтому преимущества модульных методов здесь сохраняются. Однако применение интегральных схем связано с разработкой и внедрением принципиально новых технологических процессов, таких, например, как многослойный печатный монтаж, микросварка, микропайка и др.

Процессы изготовления аппаратуры на микросхемах хорошо поддаются механизации и автоматизации.

Анализ конструктивно-технологических особенностей радиоэлектронной аппаратуры показывает:

1. Современная конструкция радиоэлектронной аппаратуры характеризуется расчлененностью на модули различной сложности и различного исполнения, объединяемые процессом стыковки в изделие.

2. Модульное конструирование является эффективным методом с точки зрения достижения наилучших технико-экономических показателей.

3. Опыт отечественной и зарубежной практики показывает, что аппаратуру обычно делят на три группы модулей: функциональный узел, субблок и блок.

4. Конструкция, состоящая из названных трех групп модулей, представляет собой обобщенную конструкцию современной радиоэлектронной аппаратуры.

5. Технологический процесс изготовления аппаратуры строится по следующей схеме: изготовление функциональных узлов и последующая их технологическая стыковка в субблоки. Субблоки стыкуются в блоки, из которых собирается аппаратура.

Такой технологический процесс представляет собой обобщенный технологический процесс изготовления современной радиоэлектронной аппаратуры.

Для рационального и квалифицированного художественного конструирования необходимо знать основные положения инженерной психологии (психотехнологии, технической психофизиологии), в которой изучают сенсорный вход Ч-О (органы чувств), моторный выход, распределение функций между Ч-О и ЭС (как преобразователями информации) и условия жизнедеятельности Ч-О. Эргономическая отработка конструкций базируется на эргономике, цель которой – совершенствование орудий и условий труда.

При эргономическом анализе исследуют рациональность выбранных зон расположения индикаторов и регуляторов, удобство пультов управления, для чего пользуются компоновочной моделью Ч-О.

Основные этапы художественно-конструкторской разработки можно представить в следующей последовательности: анализ ТЗ, предварительные эскизы, определение взаимосвязей Ч-О и ЭС, определение количества и качества индикаторов и регуляторов, определение общих объемов.

ЭС и доли в них регуляторов и индикаторов, прорисовка вариантов, поиск гармоничного по форме и цвету решения, выполнение промежуточных (обычно бумажных клеенных) макетов, окончательная отработка формы, выполнение демонстрационных плакатов и художественно-конструкторских макетов.

### **1.8. Художественно-конструкторская оценка ЭС**

Используют четыре вида оценки художественно-конструкторских показателей ЭС: правовая защита оригинальности ЭС, количественная оценка эстетических и эргономических показателей, качественная оценка и приемка опытных образцов и установочных партий на этапе авторского надзора.

Оригинальность художественно-конструкторского решения ЭС дает право на авторскую защиту его в качестве промышленного образца, что учитывается при аттестации изделий на присвоение знака качества.

Эстетические показатели качества ЭС оцениваются уровнем стилового решения формы, ее функциональностью, композиционной законченностью и качеством отделки поверхностей. Эргономические показатели качества ЭС оцениваются по удобству обслуживания, его оперативности и безопасности. По ГОСТ 16456—70 используют четыре группы эргономических показателей: гигиенические (освещенность, вентилируемость, температура, влажность, давление воздуха, напряженность электрического и магнитного полей, запыленность, радиация, токсичность, шум, вибрации, гравитационные перегрузки и ускорения на объекте-носителе ЭС), антропометрические (соответствие форме, размерам тела человека и распределению его массы), физиологические и психофизиологические (соответствие силовым, скоростным и энергетическим возможностям человека и возможностям его зрительного, слухового и осязательного анализатора), психологические (соответствие закрепленным и вновь формируемым навыкам человека и его возможностям по восприятию, переработке и выработке сигналов управления). Для численных оценок этих параметров используют экспертные методы оценки.

При качественной оценке художественно-конструкторского уровня ЭС для присвоения государственного Знака качества кроме оригинально-

сти ЭС принимают во внимание карты технического уровня изделий, где кроме эстетических и эргономических показателей учитываются и технические (функциональные) показатели. Приемка опытных образцов и установочных партий ЭС на этапе авторского надзора служит для сохранения стиля, характера и используемых материалов (определяющих оригинальность в художественно-конструкторском макете выпускаемого изделия).

---

---

## 2. МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ БАЗА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭС

---

---

### 2.1. Системный подход к проектным исследованиям ЭС

*Сложность ЭС.* С точки зрения конструирования, как уже подчеркивалось выше, ЭС является сложным по своей структуре многопараметрическим и многоцелевым диалектически противоречивым объектом.

Сложным является и весь жизненный цикл ЭС, начиная от замысла его создания до снятия с эксплуатации. На рис. 2.1 жизненный цикл ЭС показан цепочкой верхних блоков (этапов). Этапы жизненного цикла раскрыты цепочкой нижних блоков (стадий). На всех стадиях проектирования итеративно, вначале приближенно, а затем с уточнениями осуществляется разработка принципиальной схемы, конструирование и технологическая подготовка производства ЭС.

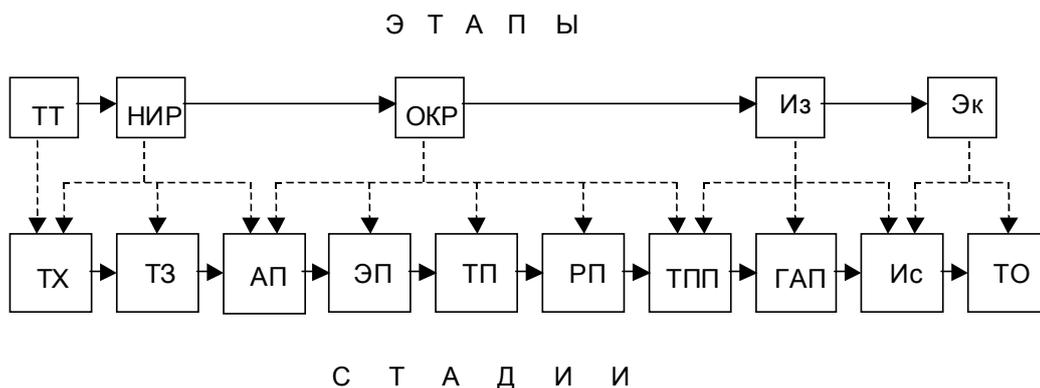


Рис. 2.1. Этапы и стадии жизненного цикла ЭС:

*ТТ* – технические требования; *НИР* – научно-исследовательские работы; *ОКР* – опытно-конструкторские работы; *Из* – изготовление; *Эк* – эксплуатация; *ТХ* – технические характеристики; *ТЗ* – техническое задание; *АП* – аванпроект (техническое предложение); *ЭП* – эскизное проектирование; *ТП* – техническое проектирование; *РП* – рабочее проектирование; *ТПП* – техническая подготовка производства; *ГАП* – гибкое автоматизированное производство; *Ис* – испытания; *ТО* – техническое обслуживание

Проектирование ЭС имеет особенности, связанные с неопределенностями исходных данных при решении ряда проектных задач. Например, в начале проектирования при расчете принципиальной схемы ЭС нет точных данных о паразитных проводимостях, емкостях и индуктивностях монтажа, о значениях температур на радиоэлементах, так как не существует детальных чертежей конструкции. В то же время детальная проработка конструкции ЭС с расчетом его теплового режима не может быть осуществлена до разработки принципиальной схемы без точных данных о мощностях тепловыделения в каждом радиоэлементе, получаемых из электрического расчета принципиальной схемы. В результате и электрический, и тепловой расчеты могут быть проведены вначале приближенно, по ориентировочно заданным параметрам, затем эти расчеты итеративно уточняются. Аналогично связаны между собой и другие расчеты схем, конструкций и технологических процессов производства ЭС.

Таким образом, ЭС представляется сложным прежде всего с точки зрения его проектирования. Причем развитие микроэлектроники все больше усугубляет проблему сложности ЭС добавлением новых взаимосвязей различных схмотехнических, технологических и эксплуатационных факторов. Поэтому при разработке современных ЭС трудно говорить о чисто конструкторских или технологических задачах вне их взаимосвязи со схмотехникой и эксплуатацией.

Фактически разработка высоконадежного ЭС представляется как последовательность комплексных проектных исследований схем, конструкций и технологии производства с целью обеспечения требуемых выходных характеристик в заданных условиях эксплуатации. Комплексность достигается системным подходом. А расчет выходных характеристик ЭС при этом сводится, как правило, к расчетам условий протекания соответствующих физических процессов в схемах и конструкциях.

*Системный подход к анализу физических процессов.* На рис. 2.2 для примера показана связь трех видов расчетов, которые особенно характерны для ЭС, эксплуатируемых на подвижных объектах.

Так как в конструкциях ЭС при функционировании одновременно протекает множество разнородных физических процессов (электромагнитных, тепловых, механических, влагодиффузионных, радиационных и пр.), то системный подход к конструированию аппаратуры может быть

сформулирован с этой точки зрения в виде требования проследить как можно большее количество внутренних и внешних связей протекающих процессов с тем, чтобы не упустить действительно существенные связи и факторы и оценить их эффекты. В то же время системный подход обращает внимание на недостаточность, а часто и вредность чисто локальных решений, полученных на основе охвата небольшого числа существенных факторов. Окончательные решения в целом для ЭС в этом случае могут быть неправильными.

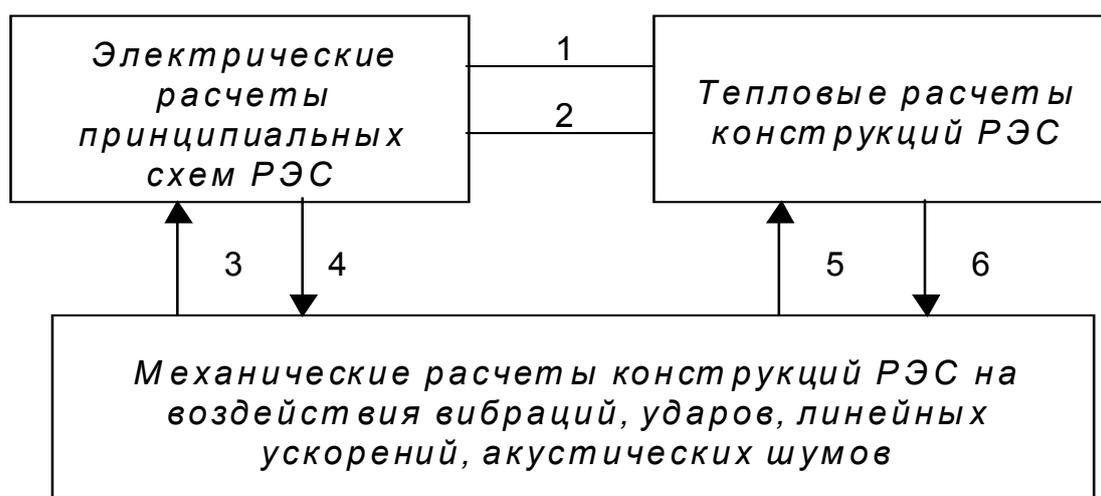


Рис. 2.2. Взаимосвязь трех основных видов расчетов при разработке ЭС для подвижных объектов:

- 1 – передача мощностей тепловыделений в РЭ; 2 – передача температур РЭ;
- 3 – передача ускорений вибраций, ударов и других механических воздействий на радиоэлементы; 4 – передача масс РЭ (для элементной базы, выбранной по результатам электрического расчета);
- 5 – передача эффективных значений зазоров в местах крепления деталей (для расчета контактных тепловых сопротивлений и тепловых мощностей демпфирования, возникающих при вибрации);
- 6 – передача температур конструктивных деталей

С точки зрения возможности нарушения системного подхода в проектных исследованиях очень опасна практикуемая на предприятиях, разрабатывающих ЭС, специализация инженерных работ (отделы системотехников, схемотехников, конструкторов, технологов). Более того, выделяются группы по тепловым, прочностным (механическим) и другим расчетам, группы надежности и испытаний и пр. В результате, обеспечив по отдельности тепловой режим, механическую прочность, электромаг-

нитную совместимость и другие характеристики по различным воздействиям, разработчики ЭС встречаются с тем фактом, что эти характеристики не выдерживаются при комплексных испытаниях или во время эксплуатации, когда все воздействия прикладываются к ЭС одновременно. Сказывается системный эффект. Например, тепловой процесс протекает по-разному при отсутствии или наличии других факторов. Особенно важен системный подход при исследовании надежности ЭС, когда требуется выявить и нейтрализовать последствия наиболее неблагоприятного сочетания внешних факторов.

*Радиоэлектронное средство как методологическая система.* Технически ЭС является частью РЭ системы, которая в данном случае рассматривается как совокупность объектов, функционально объединенных для выполнения поставленной цели. При системном подходе к проектированию РЭ системы происходит переход от понятия технической системы к методологическому понятию системы как объекта приложения методов общей теории систем. В этом случае ЭС может в методологическом плане рассматриваться как подсистема данной системы.

С другой стороны, ЭС как сложный объект проектирования может и должен рассматриваться как самостоятельная система, что позволит применить методологию системного подхода при проведении проектных исследований. Это дает возможность выявить и четко сформулировать проблемы проектирования ЭС в условиях большой неопределенности исходных данных, определить стратегию разработок данного класса ЭС, обосновать границы проведения проектных исследований рассматриваемого ЭС, точно задать функционально необходимые и паразитные входы и выходы, установить структуру ЭС как системы и связи между структурными составляющими, предусмотреть другие системные работы, охватывающие различные специализированные группы проектировщиков, производственников и эксплуатационников.

Разделение ЭС как системы на подсистемы может проводиться с различных точек зрения. Часто рассматривают состав ЭС исходя из функциональных назначений узлов или конструктивных особенностей. В данном случае рассмотрим состав сложного ЭС с позиций задач проектирования, направленных на обеспечение его высокой надежности и качества. Такой состав показан на рис. 2.3. Данный состав ЭС соответству-

ет той специализации работ на промышленных предприятиях, о которой упоминалось выше.

Группа системотехников занимается разработкой алгоритма ЭС, т. е. составляет наилучшую последовательность преобразования сигналов и помех, обеспечивающую выделение, передачу, преобразование и накопление необходимой информации в соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к ЭС. Разработчики принципиальной электрической схемы, или схемотехники, реализуют алгоритм через совокупность соединенных между собой радиоэлементов. Конструкторы далее создают проект пространственно-материального воплощения электрической схемы в виде конструкции ЭС. Технологи проектирующих подразделений разрабатывают технологическую документацию на изготовление данной конструкции ЭС с помощью существующего оборудования. А технологи производственных подразделений непосредственно обеспечивают изготовление ЭС с учетом особенностей конкретного технологического процесса. Наконец, эксплуатационники занимаются использованием готового ЭС по назначению.

Даже из такой краткой характеристики видна тесная связь пяти подсистем «алгоритм», «схема», «конструкция», «технология» и «эксплуатация» внутри системы «ЭС». Эта связь вытекает не только из той естественной последовательности работ, которая наблюдается при переходе от одной подсистемы к другой. Из системного анализа следует, что все подсистемы связаны между собой, причем важно эти связи охватить с единых позиций.

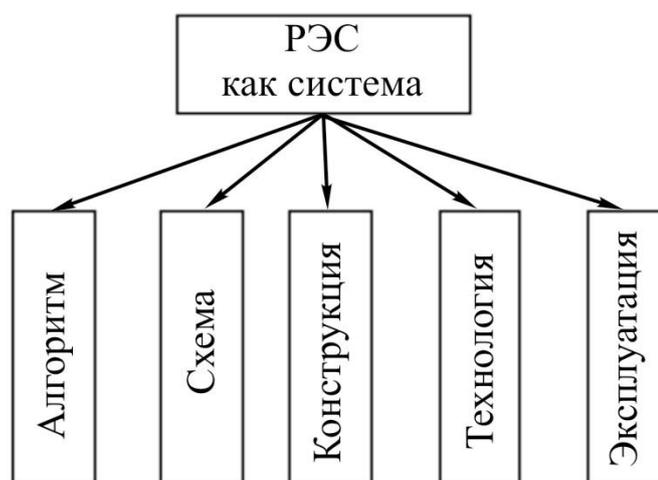


Рис. 2.3. Состав (подсистемы) сложного ЭС как системного объекта проектирования

Общесистемным свойством ЭС, объединяющим все его подсистемы, является свойство надежности, которое закладывается при проектировании аппаратуры, обеспечивается при производстве и поддерживается во время эксплуатации. Аналогичное можно сказать и о другом более общем свойстве ЭС – свойстве качества, которое характеризуется не только показателями надежности, но и показателями назначения (включая технические характеристики), показателями технологичности (включая затраты на разработку, производство и эксплуатацию), показателями стандартизации и унификации и пр. Все эти показатели характеризуют ЭС в целом, т. е. как систему.

Решение задач анализа, а также обеспечения надежности и качества ЭС проводится на всех этапах его проектирования. Достоверно показатели надежности и качества ЭС могут быть оценены только при реализации системного подхода в этих задачах.

*Признаки системного подхода.* Наличие системного подхода при выполнении тех или иных отдельных работ по созданию конструкций ЭС или проектированию технологических процессов отождествляется со следующими тремя отличительными признаками.

1) Если исследуемый объект (конструктивный узел, физический процесс в конструкции, технологическая операция и т. п.) представляется в виде системы, то в нем можно выделить совокупность элементов (подсистем), каждый из которых при определенных условиях может быть рассмотрен как отдельная самостоятельная система. Сам объект также при определенных условиях становится элементом другой системы более высокого уровня (суперсистемы). Создается определенная иерархия систем, показанная на рис. 2.4.

2) Необходимая полнота элементов, включенных в систему из исследуемого объекта (замкнутость системы), определяется по силе связи между этими элементами, которая должна быть более чем на два порядка больше силы связи этих же элементов с другими элементами, не входящими в данную систему. Этот признак свидетельствует о возможности исследовать объект автономно, выделив его из окружающей среды в целостном виде как систему.

3) Целесообразность представления исследуемого объекта в виде системы проверяется на свойстве *эмерджентности*, а именно система

должна обладать новыми свойствами, не присущими ни одному из ее элементов. Это означает, что, расчленив объект на части и изучая их по отдельности, нельзя познать все его свойства.

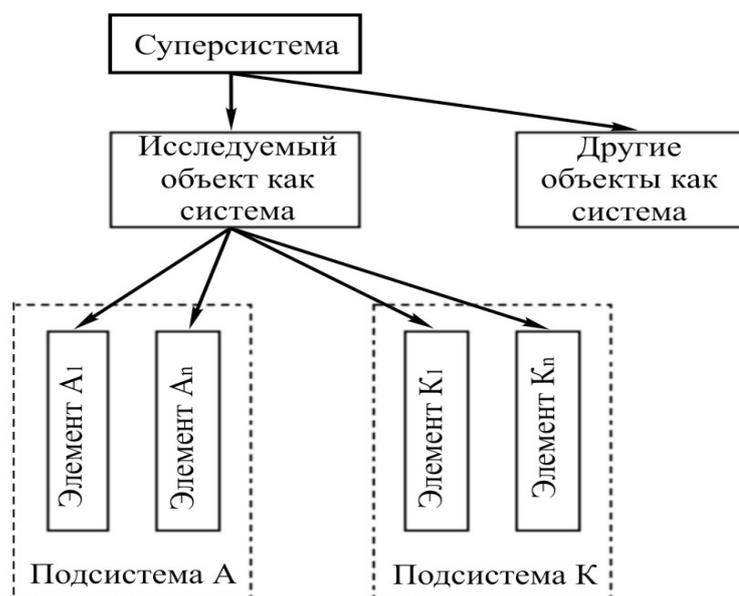


Рис. 2.4. Иерархия систем при системном подходе  
 $m, n$  — число элементов в подсистемах А и К

Именно поэтому, когда конкретная конструкция ЭС с точки зрения надежности представляется как система протекающих физических процессов (электромагнитных, тепловых, механических и пр.), изучение каждого процесса в отдельности как элемента системы и обеспечение надежности ЭС с точки зрения каждого отдельного процесса еще не гарантируют полного выявления особенностей свойства надежности ЭС, проявляющихся при совместном действии факторов. Обусловить высокую надежность ЭС в целом можно, только изучив взаимодействия совокупности физических процессов как систему.

## 2.2. Основы системного анализа

Системный анализ конструкций и технологии ЭС проводится в виде комплексного моделирования совокупности протекающих физических, а также организационно-экономических и прочих процессов. Будем в дальнейшем называть термином «технический» любой процесс, подлежащий системному анализу.

Условное изображение технического процесса как системы. Любой технический процесс, рассматриваемый в конструировании или технологии ЭС, можно формально описать через математический оператор, связывающий множество выходных характеристик:

$$Y = [y_1 y_2 \dots y_i \dots y_N]^T, \quad (2.1)$$

где  $T$ —знак транспонирования вектора с множеством входных воздействий

$$x = [x_1 x_2 \dots x_i \dots x_M] \quad (2.2)$$

и с множеством внутренних параметров

$$q = [q_1 q_2 \dots q_k \dots q_L]^T, \quad (2.3)$$

зависящих от множества внешних факторов

$$z = [z_1 z_2 \dots z_r \dots z_P]^T. \quad (2.4)$$

В общем виде операторное описание любого процесса представляется равенством

$$y(\xi) = \{x(\xi), q(z)\}, \quad (2.5)$$

где  $\xi = t, \omega, s, l, \dots$  (2.6)

- независимый аргумент ( $t$ —время,  $\omega$  —круговая частота,  $s$ — переменная преобразования Лапласа,  $l$ —пространственная координата). Формы представления (2.5) в виде аналитической, структурной, топологической или морфологической моделей будут рассмотрены позже.

Здесь следует остановиться на формализованном представлении любого рассматриваемого технического процесса в системном виде (рис. 2.5), с помощью которого можно уточнить, какие величины относятся к воздействиям, характеристикам, факторам и параметрам.

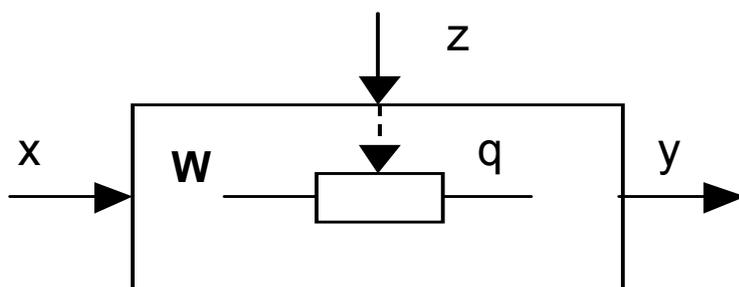


Рис. 2.5. Формализация технического процесса

В научной литературе существует значительная разноречивость в трактовке перечисленных понятий. В системном подходе эти понятия являются исходными и поэтому должны быть однозначно определены с учетом того, что одна и та же величина в разнородных физических процессах, протекающих в ЭС, и в конкретных задачах проектирования может играть различную роль. Так, тепловая мощность может быть в электрических расчетах выходной характеристикой, в тепловых расчетах—входным воздействием, а в механических расчетах—внешним фактором. Другой пример: выходное сопротивление усилителя может быть выходной характеристикой при его проектировании или внутренним параметром радиоэлектронного устройства, при проектировании и производстве которого сам усилитель используется как компонент.

Представление каждого технического процесса в виде отдельной расчетной системы, изображенной на рис. 2.5, является по сути дела средством выделения этого процесса с целью его расчета и исследования, при котором другие процессы, в соответствии с терминологией системотехники, играют роль внешней среды, воздействующей на рассматриваемую систему, т. е. на исследуемый процесс. Таким образом, основу системного подхода составляет рассмотрение каждого технического процесса как интегрального целого, обладающего внутренней организацией (структурным построением), обусловленной конкретной схемой и конструкцией ЭС или технологического оборудования, взаимодействующего с внешней средой, в которую помимо окружающих условий эксплуатации входят другие системы, представляющие собой иные технические процессы рассматриваемого объекта.

*Выходные характеристики, внутренние параметры, входные воздействия и внешние факторы.* При такой формализации под выходной характеристикой  $y_1$  понимается числовая величина или функция аргумента  $\xi$ , описывающая характерные свойства (с точки зрения рассматриваемого технического процесса) объекта проектирования, производства и эксплуатации в качестве функционального и конструктивно законченного устройства. С другой стороны, если ЭС рассматривается как компонент РЭ системы, т. е. фактически ведется проектирование этой системы, а не ЭС, то выходные характеристики ЭС играют роль параметров этого компонента. В этом случае характеристики ЭС иногда называют внешними или

выходными параметрами, в отличие от параметров его элементов, которые называют внутренними или выходными параметрами ЭС. Иногда входные сигналы также предлагается считать параметрами.

В дальнейшем термин «параметр» будем применять в узком смысле, т. е. под параметром  $q_k$  будем понимать числовую величину, характеризующую определенное физическое свойство элемента или взаимосвязь элементов схемы, конструкции ЭС или технологического оборудования, в котором протекает рассматриваемый физический процесс.

Например, для электрического процесса, протекающего в схеме ЭС, выходными характеристиками часто являются комплексный коэффициент передачи ( $\xi = s$ ), амплитудно- и фазочастотная характеристики ( $\xi = \omega$ ), импульсная и переходная характеристики ( $\xi = t$ ) и др., а параметрами – проводимость (сопротивления), емкость, индуктивность, коэффициент трансформации, коэффициент усиления (передачи) и прочие величины, входящие в эквивалентные схемы электрических элементов ЭС. Для механического процесса, протекающего в конструкции ЭС или технологического оборудования при вибрациях, ударах и других механических воздействиях, в качестве выходных характеристик рассматриваются коэффициент динамичности конструкции ( $\xi = s$ ), распределение амплитуды ускорений вибрации по конструкции ( $\xi_1 = l_1, \xi_2 = l_2, \xi_3 = l_3$ ), отклик конструкции в заданной точке на удар ( $\xi = t$ ) и др., а в качестве параметров – модуль упругости материалов, коэффициент Пуассона, коэффициент демпфирования колебаний, удельная плотность материалов и пр. Тепловой процесс в ЭС характеризуется переходной характеристикой разогрева ( $\xi = t$ ), общим операторным тепловым сопротивлением ( $\xi = s$ ), стационарным температурным полем ( $\xi_1 = l_1, \xi_2 = l_2, \xi_3 = l_3$ ) и др., а параметрами в этом случае являются коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность материалов, геометрический размер элементов, степень черноты поверхностей и пр.

Указанные выше параметры можно назвать простыми. В отличие от простых широко используются обобщенные параметры, которые являются функциями от простых параметров и характеризуют совокупные свойства определенного элемента, соединений элементов или узлов в целом. К обобщенным параметрам относятся электрические и тепловые постоянные времени, механические жесткости участков конструк-

ций, электрические, механические и тепловые коэффициенты передачи узлов и т. п.

Электрические, механические и тепловые возмущения, действующие на схему и конструкцию ЭС, принципиально следует разделить на две категории: входные воздействия и внешние факторы. Входным воздействием  $x_i$  считается переменная физическая величина, вызывающая появление или динамическое изменение рассматриваемого физического процесса в схеме или конструкции ЭС при неизменных значениях их параметров (за исключением так называемых переменных параметров, зависящих от переменных величин протекающего процесса). Напротив, внешним фактором  $Z_r$  считается такая физическая величина, которая, имея физическую природу, отличную от рассматриваемого процесса, вызывает изменения параметров схемы или конструкции ЭС независимо от входных воздействий этого процесса.

Например, для электрического процесса в схеме ЭС входными воздействиями служат прикладываемые напряжения и токи, а внешними факторами—температурные потенциалы РЭ (тепловой фактор) и их механические ускорения или внутренние механические напряжения и деформации (механический фактор), изменяющие электрические параметры схемы. Для механического процесса в конструкции ЭС входными воздействиями являются кинематические вибрационные перемещения мест крепления ЭС к объекту его установки или силовые ударные воздействия на конструкцию ЭС со стороны окружающей среды, а тепловым фактором служит температурное поле конструкции, которое оказывает значительное влияние на ее физико-механические параметры. Наконец, для теплового процесса в конструкции ЭС в качестве входных воздействий фигурируют тепловые мощности, выделяемые в радиоэлементах, и температура окружающей среды, а в качестве механического фактора — деформационные зазоры от вибраций между соприкасающимися поверхностями деталей конструкций ЭС, которые увеличивают контактные тепловые сопротивления.

Параметры всех физических процессов, протекающих в ЭС, подвержены также технологическому фактору (разбросам изготовления) и временному фактору (постепенным изменениям из-за старения и износа).

*Показатели параметрической чувствительности.* Под параметрической чувствительностью системы (ЭС или технологического процесса) понимается ее свойство изменять свои выходные характеристики при изменении внутренних параметров. При этом входные воздействия рассматриваются равными своим расчетным значениям без отклонений, т. е. не вносящими вклада в изменения выходных характеристик. Причины изменений параметров могут быть различными. В ЭС параметры изменяются под влиянием случайных факторов или при специально вводимых коррекциях, регулировках, настройках и других работах. С изменением параметров связаны решения многих задач конструирования ЭС или разработки его технологии.

Чувствительностью к изменению внутренних параметров обладают практически все выходные характеристики системы, но в разной степени. Поэтому основной проблемой теории параметрической чувствительности является разработка эффективных методов количественной оценки влияния каждого параметра на рассматриваемые выходные характеристики при наличии физической разнородности и параметров, и характеристик, обусловленной разнородностью электрических, механических, тепловых и других физических процессов, протекающих в схемах и конструкциях аппаратуры. Форма количественного показателя параметрической чувствительности должна быть единой для всех характеристик и параметров.

В общей теории чувствительности систем широко используется количественный показатель параметрической чувствительности в виде частной производной выходной характеристики по соответствующему параметру, названной функцией чувствительности (ФЧ). В принятых нами обозначениях абсолютную ФЧ  $j$ -й выходной характеристики к  $k$ -му параметру будем записывать так:

$$A_{q_k}^{y_j}(\xi) = \left( \frac{\partial y_j(\xi)}{\partial q_k} \right)_q, \quad (2.7)$$

где  $q$ —вектор расчетных значений параметров, при которых вычисляется частная производная. Смысл введения количественных показателей параметрической чувствительности конструкций или технологии ЭС в виде

функции (2.7) состоит в том, что в инженерной практике в большинстве случаев при малых вариациях

$$\Delta q = [\Delta q_1 \Delta q_2 \dots \Delta q_L]^T$$

параметров  $q$  вариации

$$\Delta y = [\Delta y_1 \Delta y_2 \dots \Delta y_N]^T$$

выходных характеристик  $y$  с приемлемой точностью можно выразить через абсолютные ФЧ (2.7);

$$\Delta y = A_q^y \Delta q \quad (2.8)$$

$$A_q^y = \begin{bmatrix} A_{q_1}^{y_1} & A_{q_2}^{y_1} & \dots & A_{q_L}^{y_1} \\ A_{q_1}^{y_2} & A_{q_2}^{y_2} & \dots & A_{q_L}^{y_2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{q_1}^{y_N} & A_{q_2}^{y_N} & \dots & A_{q_L}^{y_N} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

где (2.9) – абсолютная матрица чувствительности, причем

$$\Delta q = q - q^0; \Delta y = y - y^0.$$

Фактически выражение (2.9) представляет собой линейную часть разложения  $y$  в ряд Тейлора вокруг расчетной точки. Полная формула ряда Тейлора для  $j$ -й выходной характеристики имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta y_i = & \sum_{k=1}^L \left( \frac{\partial y_i}{\partial q_k} \right)_q \Delta q_k + \frac{1}{2!} \sum_{k=1}^L \left( \frac{\partial^2 y_i}{\partial q_k^2} \right)_q \Delta q_k^2 + \\ & + \sum_{k < l} \left( \frac{\partial^2 y_i}{\partial q_k \partial q_l} \right)_q \Delta q_k \Delta q_l + \dots \end{aligned} \quad (2.10)$$

Поэтому в случае необходимости более точного получения вариации  $\Delta y_1$  требуется предварительно каким-либо образом определить частные производные второго и более высоких порядков. Именно эти производные отождествляют часто с функциями чувствительности соответствующими

щего порядка. Однако, обращая внимание на физическую трактовку параметрической чувствительности в конструировании и технологии ЭС, можно предложить иное представление ФЧ высокого порядка.

Запишем разложение (2.10) в ряд Тейлора в другой форме:

$$\Delta y_i = \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{r_1+\dots+r_L=p} \frac{1}{r_1! \dots r_L!} \left( \frac{\partial^2 y_i}{\partial q_1^{r_1} \dots \partial q_L^{r_L}} \right)_q \partial q_1^{r_1} \dots \partial q_L^{r_L}. \quad (2.11)$$

Тогда абсолютную ФЧ  $p$ -го порядка в общем виде можно представить следующим образом:

$$A_{q_1^{r_1} \dots q_L^{r_L}}^{y_i}(\xi) = \frac{1}{r_1! \dots r_L!} \left( \frac{\partial^2 y_i(\xi)}{\partial q_1^{r_1} \dots \partial q_L^{r_L}} \right)_q. \quad (2.12)$$

Из (2.11) и (2.12) физический смысл количественного показателя параметрической чувствительности виден в следующем: абсолютная ФЧ  $j$ -й характеристики  $p$ -го порядка при заданном наборе параметров есть аддитивная составляющая абсолютной вариации  $j$ -й характеристики при единичных вызвавших ее абсолютных вариациях рассматриваемого набора параметров. Другими словами, можно записать так: абсолютная ФЧ  $j$ -й характеристик  $p$ -го порядка при заданном наборе параметров есть функция, на которую необходимо умножить произведение степеней абсолютных вариаций рассматриваемого набора параметров, чтобы получить соответствующую аддитивную составляющую вызванной ими абсолютной вариации  $j$ -й характеристики.

При таком определении абсолютная ФЧ первого порядка (2.7) является частным случаем абсолютной ФЧ  $p$ -го порядка (2.12) при  $p=1$ . Каждая из абсолютных ФЧ ЭС имеет размерность, равную отношению размерности  $j$ -й характеристики аппаратуры к произведению размерностей заданного набора параметров в соответствующих степенях.

Однако в некоторых задачах конструирования и разработки технологии ЭС, например, в тех случаях, когда при решении задачи производится количественное сравнение функций чувствительности, предпочтительнее относительная форма представления данных.

Для получения относительно-абсолютных показателей параметрической чувствительности разделим левую и правую части выражения (2.11) на  $y_i$ :

$$\delta y_i = \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{r_1+\dots+r_L=p} T_{q_1^{r_1} \dots q_L^{r_L}}^{y_i} \Delta q_1^{r_1} \dots \Delta q_L^{r_L}. \quad (2.13)$$

$$T_{q_1^{r_1} \dots q_L^{r_L}}^{y_i} = \frac{1}{r_1! + \dots + r_L! y_i} \left( \frac{\partial^p y_i}{\partial q_1^{r_1} \dots \partial q_L^{r_L}} \right)_q \quad (2.14)$$

- относительно-абсолютная ФЧ. Эту форму показателя чувствительности удобно применить для количественного описания влияния на выходные характеристики ЭС температуры, механического напряжения и прочих факторов.

Если в выражении (2.13) каждое слагаемое умножить и разделить на  $q_1^0, q_2^0, \dots, q_L^0$ , то получится связь относительных вариаций параметров и выходной характеристики:

$$\delta y_i = \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{r_1+\dots+r_L=p} T_{q_1^{r_1} \dots q_L^{r_L}}^{y_i} \delta q_1^{r_1} \dots \delta q_L^{r_L}, \quad (2.15)$$

где  $\delta q_k = \Delta q_k / q_k$  - относительная вариация  $k$ -го параметра.

$$S_{q_1^{r_1} \dots q_L^{r_L}}^{y_i} = \frac{q_1^{r_1} \dots q_L^{r_L}}{y_i r_1! + \dots + r_L!} \left( \frac{\partial^p y_i}{\partial q_1^{r_1} \dots \partial q_L^{r_L}} \right)_q = \frac{q_1^{r_1} \dots q_L^{r_L}}{y_i} A_{q_1^{r_1} \dots q_L^{r_L}}^{y_i} \quad (2.16)$$

- относительная ФЧ.

Выражение (2.15) является исходным при анализе и синтезе допустимых отклонений параметров конструкции ЭС при наличии ограничений по унификации и стандартизации.

### 2.3. Вопросы проектирования конструкций и технологических процессов

Современный системный подход к конструированию, технологии и надежности ЭС обуславливает необходимость применения компьютера для решения задач различного физического характера, направленных на удовлетворение жестких требований технического задания по внешним

воздействиям. В связи с большой сложностью возникающих задач разработка автоматизированных методов проектирования ЭС в настоящее время направлена на создание таких системных методов, которые дают возможность инженеру получить информацию об изменениях технических характеристик аппаратуры при возможных вариациях тех или иных параметров и на этой основе принять обоснованные варианты конструкторско-технологических решений.

Эффективность автоматизированного решения современных задач конструирования, технологии и надежности ЭС с успехом может быть повышена за счет наиболее полного использования идей и методов теории параметрической чувствительности.

*Теоретические исследования сущности основных задач проектирования.* Теоретические исследования проведем исходя из операторного описания (2.6) технических процессов рассматриваемого ЭС.

При заданном расчетном векторе  $x^3$  воздействий и заданном операторе  $W^3$  с соответствующими параметрами  $q^3$  заданное значение вектора выходных характеристик

$$y^3 = W^3 \{x^3, q^3(z^3)\}.$$

При разработке ЭС иногда ограничиваются расчетным оператором  $W^0$ , несколько отличным от заданного  $W^3$ . Тогда при заданном расчетном векторе воздействий  $x^0$  и операторе  $W^0$  с расчетным вектором параметров  $q^0$  имеет место расчетный вектор  $y^0$  исходных характеристик:

$$\overset{\circ}{y} = \overset{\circ}{W} \{\overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{q}(\overset{\circ}{z})\}. \quad (2.17)$$

В реальных условиях ЭС функционирует при варьированных векторах параметров  $q$  и входных воздействиях  $x$ , что приводит к варьированию вектора выходных характеристик:

$$y = \overset{\circ}{W} \{x, q(z)\}. \quad (2.18)$$

Для дальнейшего исследования выражение математического описания (2.18) разложим в ряд Тейлора вокруг расчетной точки:

$$y = y + A_q^y(q - q) + A_x^y(x - x), \quad (2.19)$$

где  $A_q^y$  и  $A_x^y$  – матрицы абсолютных функций чувствительности первого порядка. Вычитая (2.16) из (2.19), получаем абсолютную вариацию вектора выходных характеристик:

$$y - y^3 = W\{x, q\} - W^3\{x^3, q^3\} + A_q^y(q - q) + A_x^y(x - x).$$

Принимая обозначения с учетом (2.17):

$$\Delta q = q - q; \quad \Delta x = x - x,$$

окончательно получаем

$$\Delta y = y - y; \quad \Delta W = W - W;$$

$$\Delta y = \Delta W + A_q^y \Delta q + A_x^y \Delta x.$$

Таким образом, погрешность выходной характеристики складывается из трех погрешностей:

$$\Delta y = \Delta y^{\Pi} + \Delta y^c + \Delta y^{\kappa},$$

где  $\Delta y^{\Pi} + \Delta W$  – погрешность, обусловленная отличием расчетного оператора ЭС от идеального (такая погрешность допускается при проектировании исходя из возможностей реализации проекта);

$\Delta y^q = A_q^y \Delta q$  – погрешность, обусловленная отклонением реальных значений параметров ЭС от расчетных под влиянием технологических и эксплуатационных факторов, т. е.

$$\Delta y^q = \Delta y^{q^{\tau}} + \Delta y^{q^{\varepsilon}} = A_q^y (\Delta q^{\tau} + \Delta q^{\varepsilon})$$

(индексы  $\tau$  и  $\varepsilon$  обозначают технологические и эксплуатационные погрешности);  $\Delta y^x = A_x^y \Delta x$  – погрешность, обусловленная отклонением вектора входных возмущающих воздействий от расчетного значения во время функционирования ЭС (эта погрешность должна быть отнесена к экс-

платационной). Группируя отдельно технологическую  $\Delta y^T$  и эксплуатационную  $\Delta y^Э$  составляющие погрешности, получаем

$$\Delta y = \Delta y^T + y^T + \Delta y^Э. \quad (2.20)$$

Причём

$$\Delta y^T = A_q^y \Delta q^T; \quad (2.21)$$

$$\Delta y^Э = A_q^y \Delta q^Э + A_x^y \Delta x. \quad (2.22)$$

Полученное уравнение погрешности (2.20) вместе с равенствами (2.21) и (2.22) может послужить основой для рассмотрения сущности основных задач проектирования ЭС, решаемых с применением компьютера, и той роли, которую играют при этом методы ТПЧ.

Действительно, в процессе проектирования ЭС можно выделить три рода расчетных задач, помещенных в нижней части структурной схемы на рис. 2.6. С первым слагаемым равенства (2.20)—погрешностью проектирования  $\Delta y^T$ —связаны расчетные задачи первого рода, объединенные под названием «Выбор и оптимизация структур схемы, конструкции и технологии». Одна из главных целей этих задач – снизить модуль погрешности проектирования при выполнении требований по характеристикам и показателям оптимальности.

Со вторым и третьим слагаемыми равенства (2.20) — технологической  $\Delta y^T$  и эксплуатационной  $\Delta y^Э$  погрешностями—связаны расчетные задачи второго и третьего родов («Исследование разбросов параметров» и «Обеспечение качества и надежности» – рис. 2.6). Внутри каждого из этих родов выделяются задачи, направленные на исследование только технологических (оценки точности, серийной пригодности аппаратуры, определение мест регулировки) или только эксплуатационных (оценка стабильности работы, определение точек контроля работоспособности, разработка мер по защите аппаратуры от внешних воздействий) погрешностей. Расчеты показателей надежности ЭС требуют учета и тех и других погрешностей.

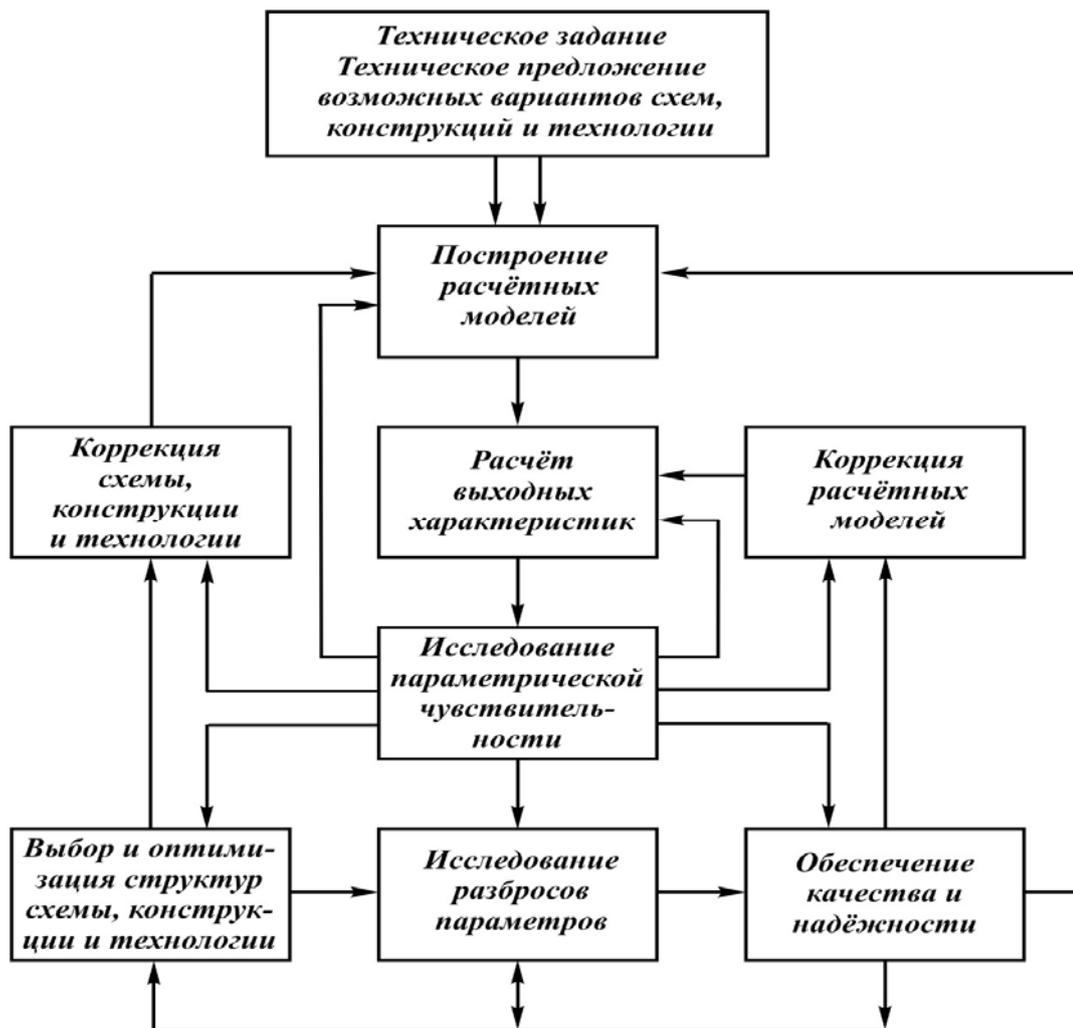


Рис. 2.6. Задачи конструирования и технологии ЭС, решаемые на основе исследования параметрической чувствительности

*Роль функций чувствительности в решении проектных задач.* Вначале, как видно из рис. 2.6, следует обратиться к задаче построения расчетных математических моделей ЭС, которая предшествует всем остальным задачам и, более того, определяет успешность их решения при автоматизированном проектировании с применением компьютера. Дело в том, что при неавтоматизированном проектировании ЭС часть проектных расчетов заменяется испытаниями макетов и опытных образцов, что ведет к удлинению сроков и удорожанию проектных работ, не позволяя, однако, провести всестороннее исследование по влиянию различных сочетаний внешних факторов и разбросов параметров. Наибольший эффект от применения компьютера при проектировании ЭС может получиться только в том случае, когда используются наиболее полные расчетные математические модели технических процессов, характеризующие поведение аппара-

туры в жестких условиях внешних воздействий. Кроме того, без исходных расчетных моделей технических процессов ЭС немислимо исследование его параметрической чувствительности.

Таким образом, использование компьютера при конструкторском и технологическом проектировании требует, прежде всего, построения расчетных математических моделей ЭС, адекватных реальным условиям протекания физических процессов. В этой задаче ФЧ могут быть полезны в двух случаях.

1) При планировании эксперимента математическое описание технического процесса может быть для каждой характеристики построено через ФЧ в виде уравнения регрессии

$$y_i = b_i + \sum_{k=1}^L A_{q_k}^{y_i} q_k. \quad (2.23)$$

где  $b_i$ , – постоянные величины.

В линейном приближении ФЧ  $A_{q_k}^{y_i}$  не зависят от  $q_k$ . В квадратичном приближении в формуле (2.23) ФЧ первого порядка могут быть выражены через ФЧ второго порядка:

$$A_{q_k}^{y_i} = b + \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L A_{q_{kl}}^{y_i} q_l,$$

где  $b_{jk}$ —постоянные величины. Более точные приближения потребуют ФЧ более высоких порядков.

2) В общем случае, если расчетные модели ЭС строятся с учетом закономерности протекающих в них физических процессов, то настройка (идентификация) типовых моделей для определения значений неизвестных и труднорасчитываемых паразитных параметров и параметров сопутствующих явлений в аппаратуре может быть проведена путем параметрической оптимизации типовой модели по этим параметрам по критерию

$$H = \sum_{i=1}^N \int_{\zeta_j^H}^{\zeta_j^B} f_j(\zeta_j) [y_j(\zeta_j) - y_j^H(\zeta_j)]^2 d\zeta_j, \quad (2.24)$$

где  $y_j$ , и  $y_j^H$  —  $j$ -е выходные характеристики расчетной модели и натурального макета типовой конструкции или ее части, для которой построена

расчетная модель;  $f_j(\xi_j)$  – нормирующий множитель;  $\xi_j^H, \xi_j^B$  – нижний и верхний пределы независимой переменной (времени, пространственной координаты, частоты сигналов и пр.), внутри которых рассматривается характеристика объектов.

Оптимизацию по критерию (2.24) можно проводить на компьютере различными методами, однако в большинстве методов используют вектор-градиент критерия  $H$  с составляющими в виде ФЧ:

$$\frac{\partial H}{\partial q_k} = A_{q_k}^{H_p} = 2 \sum_{i=1}^N \int_{\xi_j^H}^{\xi_j^B} f_j(\xi_j)(y_j - y_j^H) A_{q_k}^{H_p} d\xi_j, \quad (2.25)$$

который указывает направление наибольшего возрастания критерия (2.24), значительно повышает эффективность алгоритмов оптимизации. Функции чувствительности выходных характеристик здесь играют определенную роль при многократном получении составляющих градиента (2.25). При этом требуется многократно получать ФЧ всех выходных характеристик по оптимизируемым параметрам, что составит основную часть трудоемкости процесса настройки моделей ЭС.

Следует отметить, что и в первом, и во втором случае построения расчетных моделей ЭС по значениям относительных ФЧ легко отобрать параметры, оказывающие наибольшее влияние, и таким образом значительно сократить размерности моделей и пространства оптимизации. В этом случае на определенных шагах оптимизации требуется получать ФЧ не по всем, а только по части параметров ЭС.

После получения расчетных моделей, адекватных реальным физическим процессам ЭС, можно перейти к первому роду расчетных задач, с помощью которых решить вопрос, какой вариант структурного построения схемы и конструкций аппаратуры, а также технологических процессов ее производства принять и какие значения параметров в этом варианте назначить.

Поскольку на начальном этапе проектирования обычно рассматривается несколько вариантов структурного построения схемы, конструкции и технологии проектируемого ЭС, то проводятся сравнение конкурирующих вариантов и оптимизация их параметров. На практике лучшим может считаться вариант, у которого меньше сумма модулей или квадратов ФЧ

технических характеристик аппаратуры к внешним воздействиям (климатическим, механическим и пр.) при условии, что близость номинальных значений характеристик к требуемым значениям не хуже заданной. В свою очередь, критерием близости может быть критерий (2.24), где в качестве  $y_j^H$  будет заданное значение  $y_1^Э$  характеристики. Оптимизацию на компьютере по критерию (2.24) здесь целесообразно проводить с привлечением составляющих вектора-градиента (2.25), но не по неизвестным и паразитным, а по управляемым параметрам схемы, конструкции и технологии аппаратуры. Если оптимизацию параметров проводить непосредственно на минимум суммы модулей или квадратов ФЧ, то вычисление градиента этой суммы приведет к необходимости получения ФЧ второго порядка. Следовательно, на данном этапе проектирования ЭС с использованием компьютера методы исследования параметрической чувствительности могут составить существенную часть расчетных алгоритмов.

Из рассмотренных задач вытекает, что основными требованиями к методам получения ФЧ являются: одновременность получения ФЧ нескольких выходных характеристик по всем или по отдельным выделенным параметрам; унификация и автоматизация получения ФЧ разнородных по физической природе выходных характеристик—электрических, механических, тепловых и прочих; минимальная трудоемкость получения ФЧ с учетом конкретных особенностей исходных расчетных моделей.

Аналогичное положение наблюдается на следующем этапе проектирования, связанном с решением задач второго ряда по исследованию разбросов параметров, которое проводится после выбора структуры и оптимизации параметров схемы и конструкции проектируемой ЭС.

Методически из задач проектирования на этом этапе удобно выделить задачи расчета точности, серийнопригодности, стабильности и надежности. Однако в основе всех этих задач лежат одни и те же уравнения (2.8), в которых вариации технических характеристик  $\Delta u$  и параметров  $\Delta q$  рассматриваются как случайные погрешности.

При расчете точности и стабильности на основе уравнения (2.8) вычисляются поля разбросов технических характеристик аппаратуры с учетом технологических и эксплуатационных факторов соответственно. В задачах расчета серийнопригодности и надежности с использованием (2.8) вычисляются вероятности нахождения технических характеристик внутри

допустимых границ с учетом технологических и эксплуатационных факторов соответственно.

Конкретные результаты расчетов в задачах данного этапа проектирования во многом определяют содержание следующего этапа, на котором решаются задачи третьего рода, а именно задачи по обеспечению качества и надежности ЭС. Здесь методологически можно выделить три группы задач: выбор мест регулировок и настроек ЭС, построение системы контроля ее работоспособности и разработка мер по защите аппаратуры от внешних воздействий.

В решении задач успешно могут быть использованы структурные методы теории параметрической чувствительности, которые позволяют получать ФЧ технических характеристик к изменению передаточных функций отдельных узлов, блоков и устройств ЭС. Действительно, выделение наиболее и наименее влияющих блоков дает возможность выбрать места грубой и точной регулировок и настроек, построить иерархическую структуру системы контроля работоспособности и рационально решить вопросы конструктивной защиты от внешних воздействий лишь отдельных, наиболее влияющих частей, а не всей аппаратуры в целом.

Имея в виду итеративность процесса проектирования, следует отметить, что коррекция схемы, конструкции и технологии ЭС или ее расчетных моделей (см. рис. 2.6) может быть целенаправленно проведена при наличии количественных данных о степени влияния тех или иных предполагаемых изменений параметров схемы и конструкции на выходные характеристики аппаратуры. Такую информацию содержат в себе ФЧ.

Таким образом, при системном подходе методы теории параметрической чувствительности органически проходят через все основные этапы проектирования конструкций и технологических процессов ЭС, проводимого с использованием компьютера, причем сложность алгоритмов получения ФЧ на компьютере во многом определяет трудоемкость большинства расчетных задач.

Обобщая типовые случаи применения ФЧ в задачах проектирования ЭС, рассмотрим требования к методам исследования параметрической чувствительности, которые вытекают из принципов решения рассмотренных задач, а также из необходимости снижения трудоемкости процесса решения.

К таким требованиям относятся: одновременность получения ФЧ нескольких выходных характеристик по всем параметрам и всех внутренних переменных величин рассматриваемого физического процесса ЭС по выделенным параметрам; унификация исследования параметрической чувствительности разнородных по физической природе выходных характеристик (электрических, механических, тепловых); автоматизация исследования параметрической чувствительности с использованием компьютера; эффективность (минимальная трудоемкость) получения ФЧ с учетом конкретных особенностей исходных расчетных моделей ЭС.

Существующие методы исследования параметрической чувствительности для различных классов электронной аппаратуры полностью удовлетворяют вышесформулированным требованиям. Для ЭС, в процессе проектирования которой большой объем занимают исследования параметрической чувствительности электрических, механических и тепловых, т. е. разнородных, характеристик, разработан единый комплекс методов получения ФЧ, наиболее полно удовлетворяющий выдвинутым требованиям. Весь комплекс методов, составляющий основу теории параметрической чувствительности ЭС, позволяет выбрать наиболее эффективный метод получения ФЧ в зависимости от конкретных требований решаемой задачи проектирования, от имеющейся в распоряжении вычислительной базы и от формы представления исходных расчетных моделей физических процессов в схеме, конструкции и технологическом оборудовании.

Последнее обстоятельство наиболее существенно, так как сформулированные выше требования к методам получения ФЧ примерно одинаковы со стороны различных задач проектирования. Вычислительная техника, имеющаяся в каждой проектной организации, обладает универсальными возможностями, но требует подготовки специального математического обеспечения.

#### **2.4. Принципы построения расчетных моделей и исследования параметрической чувствительности**

При системном подходе к проектированию с применением компьютера ЭС выступает как объект моделирования, т. е. происходит не только построение модели, но и исследование ее с последующим переносом полу-

ченных сведений на моделируемый объект. Исследование параметрической чувствительности ЭС является составной частью его моделирования. Поскольку одним из главных элементов процесса конструкторского и технологического проектирования ЭС служит проведение расчетов в соответствии с заданными задачами, то используемые при этом модели физических (электрических, механических, тепловых и пр.) процессов ЭС будем называть расчетными моделями.

Уточним определение расчетной модели ЭС. Под расчетной моделью понимается представленное в той или иной форме математическое описание, которое адекватно отражает сущность и характерные свойства рассматриваемого физического процесса, протекающего в схеме или конструкции аппаратуры, и используется для проведения расчетов при ее проектировании. Каждая расчетная модель является результатом математической формализации схемы или конструкции ЭС с точки зрения рассматриваемого физического процесса, т. е. ее построение служит основой и в то же время первым шагом для применения методов исследования параметрической чувствительности при автоматизированном конструировании ЭС.

Степень соответствия модели реальным процессам, протекающим в ЭС, определяет точность расчетов, проводимых на ее основе, и зависит от полноты учета существенных сторон моделируемых процессов.

Инженерные цели конструирования ЭС часто не требуют построения особо точных моделей, и термин «расчетная модель» подчеркивает наличие того уровня точности, какой необходим для практики расчетов в задачах проектирования. Обеспечить необходимую точность расчетов при автоматизированном получении и применении ФЧ в задачах конструирования ЭС можно при выполнении определенной формализации протекающих в ЭС физических процессов и при последующем использовании унифицированных исходных расчетных моделей.

Формализация предполагает осуществление таких принципов построения расчетных моделей, которые достаточно полно отражают в модели сущность и характерные стороны рассматриваемых физических процессов ЭС для любых вариантов схемно-конструкторских решений аппаратуры и различных условий эксплуатации. Унификация расчетных моделей предполагает единообразие принципов их построения для про-

цессов, различных по физической природе. Последнее как раз является предпосылкой системного подхода при моделировании ЭС, направленного на учет взаимосвязи разнородных физических процессов (электрических, механических, тепловых), одновременно протекающих в схеме и конструкции.

Важно также отметить, что унификация расчетных моделей ЭС автоматически приводит к унификации методов исследования их параметрической чувствительности, так как к одинаковым по форме представлений расчетным моделям может быть применен один и тот же метод получения ФЧ. Это позволяет в каждом случае быстро выбрать соответствующий, хорошо отработанный метод получения ФЧ.

Тот или иной вид формализации физических процессов ЭС предопределяет соответствующий математический аппарат, который применяется в конструировании, технологии и надежности ЭС. В системном подходе требуются полная унификация методов получения ФЧ и достаточно высокий уровень формализации физических процессов и унификации исходных расчетных моделей ЭС путем привлечения математического аппарата теории дифференциальных уравнений, теории графов и операционного исчисления.

Проведем классификацию расчетных моделей ЭС в соответствии с физической сущностью рассматриваемых процессов и с точки зрения формализации и унификации. Формализацию физических процессов ЭС целесообразно проводить, основываясь на существующей специализации расчетов при схемном, конструкторском и технологическом проектировании ЭС. Практика разработки ЭС показывает, что большой объем занимают электрические, механические и тепловые расчеты, т. е. соответствующие физические процессы, протекающие в схемах, конструкциях ЭС и технологическом оборудовании, играют существенную роль в их работоспособности и определяют как номинальные значения, так и разбросы характеристик.

На предприятиях, разрабатывающих ЭС, как уже указывалось, обычно выделяются специализированные подразделения, занимающиеся отдельно электрическими, механическими и тепловыми расчетами и испытаниями. Поэтому в классификации, показанной на рис. 2.7, с точки зрения принципа формализации физических процессов выделены расчет-

ные электрические, механические и тепловые модели. Кроме того, при системном подходе к конструированию ЭС требуются комплексные расчетные модели, объединяющие на единой основе указанные выше модели попарно или все три типа моделей вместе. Последующее деление названных типов моделей ясно из рис. 2.7.

Сформулируем основные принципы, исходя из которых должны строиться рассматриваемые типы моделей.

*Расчетные электрические модели должны:*

- полностью или частично (в соответствии с требованиями поставленной задачи) отражать электрические процессы, протекающие в схеме и конструкции рассматриваемого ЭС при функционировании, что должно обеспечить получение с заданной точностью необходимых электрических характеристик (режимных и функциональных); включать в себя эквивалентные схемы реальных электрических элементов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, транзисторов, трансформаторов, микросхем и пр.) с учетом их конструктивного исполнения и вида крепления;
- учитывать паразитные проводимости, емкости, индуктивности, взаимоиндуктивности и другие параметры, отражающие влияние конструкции ЭС на протекающие электрические процессы;
- учитывать электрические наводки от других ЭС, окружающих объектов и среды.

*Расчетные механические модели должны:*

- полностью или частично (в соответствии с требованиями поставленной задачи) отражать механические процессы в конструкции рассматриваемого ЭС, связанные с появлением механических деформаций и напряжений при внешних механических воздействиях, что должно обеспечить получение с заданной точностью необходимых механических характеристик ЭС (частотных – для вибраций, временных – для ударов, статических – для линейных ускорений);
- учитывать распределенность массы несущих конструкций ЭС и анизотропность механических свойств радиодеталей;
- отражать эффект внутреннего трения в радиоматериалах при деформации (особенно при резонансных колебаниях);

- учитывать реальную конечную жесткость крепления радиоэлементов к печатным платам, шасси и другим несущим конструкциям, а также соединения элементов конструкции ЭС друг с другом.

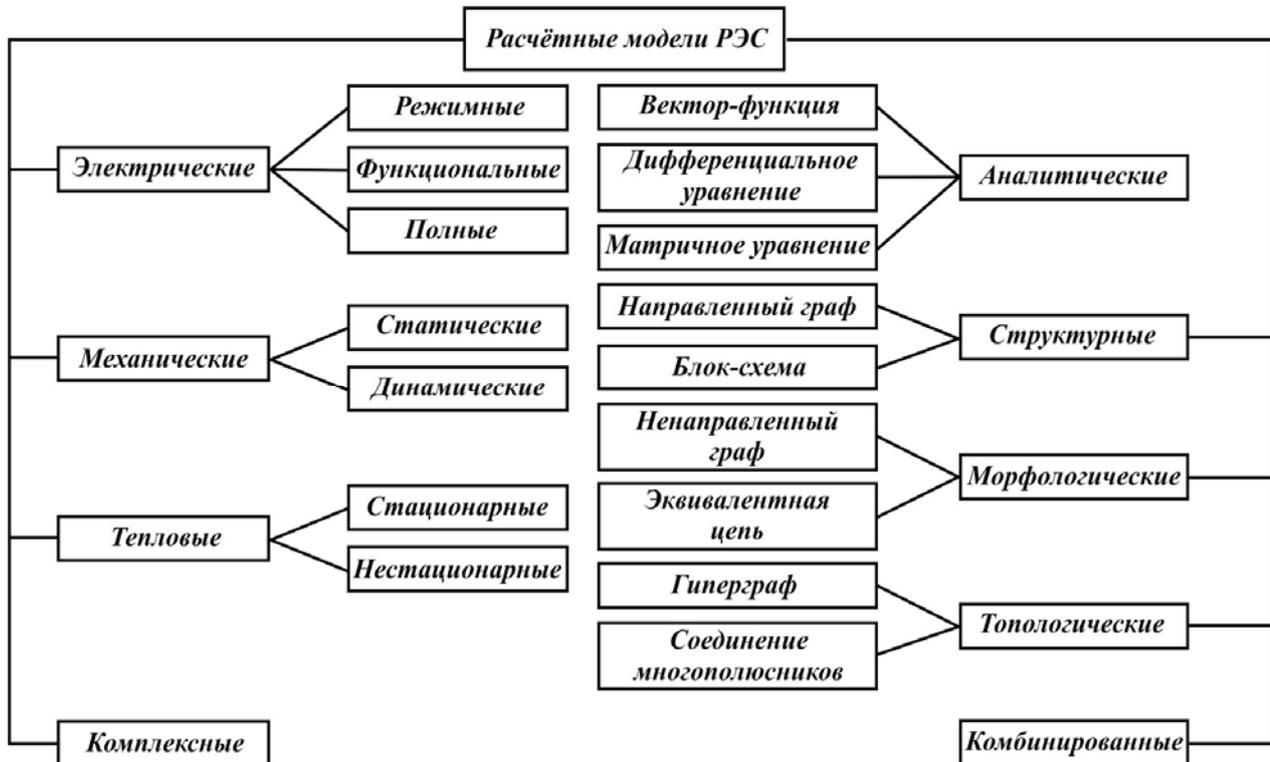


Рис. 2.7. Классификация расчетных моделей ЭС

*Расчетные тепловые модели должны:*

- полностью или частично (в соответствии с требованиями поставленной задачи) отражать тепловые процессы в конструкции рассматриваемого ЭС, связанные с теплообменом под влиянием внешней окружающей среды, внутренних тепловыделений в радиоэлементах и действия системы охлаждения или термостатирования, что должно обеспечить получение с заданной точностью необходимых тепловых характеристик ЭС;
- учитывать кондуктивные, конвективные и лучистые составляющие теплообмена в аппаратуре;
- отображать распределенность массы (как тепловой емкости) элементов конструкции ЭС и анизотропность тепловых свойств радиодеталей;

- учитывать контактные тепловые сопротивления в местах соединения деталей конструкции.

Расчетные комплексные модели должны в каждом конкретном случае удовлетворять совокупности указанных выше требований.

Методы исследования параметрической чувствительности ЭС имеют особенности для каждого из названных типов моделей, причем сложность методов в значительной мере зависит от той математической формы, в которой представляется рассматриваемая модель аппаратуры.

Разнообразные физические процессы, отражаемые электрическими, механическими и тепловыми моделями ЭС, описываются разными математическими уравнениями: алгебраическими и обыкновенными дифференциальными, волновыми, бигармоническими, теплопроводности и пр.

Таким образом, налицо большое разнообразие видов и форм расчетных моделей ЭС, которое может привести к такому разнообразию методов исследования параметрической чувствительности, причем довольно сложных и громоздких, что потребуются длительное время на их разработку без достаточной уверенности в возможности сделать каждый из них пригодным для практического использования.

Выход из этого положения лежит в унификации расчетных моделей ЭС, что является вполне возможным даже для разнородных физических процессов. Основой унифицированного представления расчетных моделей ЭС служит существующая аналогия математических описаний различных физических процессов. Для перехода от разных по виду уравнений в частных производных к обыкновенным дифференциальным уравнениям осуществляется дискретизация пространства конструкции, в котором рассматривается физический процесс.

Как показано в классификации, представленной на рис. 2.7, в настоящее время применяются следующие унифицированные виды расчетных моделей ЭС: аналитические, структурные, топологические, морфологические и комбинированные, которые наиболее полно обеспечивают эффективное исследование параметрической чувствительности в широком круге задач автоматизированного проектирования схем, конструкций и технологии ЭС.

Под аналитической расчетной моделью понимается математическая модель, представленная средствами математического анализа и алгебры в

форме буквенных выражений, определяющих зависимость выходных характеристик ЭС и его показателей от входных воздействий, внутренних параметров и независимых аргументов (времени, частоты, пространственных координат, переменной преобразования Лапласа и пр.).

Под структурным расчетом модели понимается математическая модель, представленная в форме направленного графа или блок-схемы, определяющих внутреннее строение аппаратуры с точки зрения последовательности преобразования ее переменных величин в соответствии с принятыми причинно-следственными связями в протекающих физических процессах.

Под топологической расчетной моделью понимается математическая модель, изображенная как эквивалентная электрическая, механическая или тепловая цепь или в общем виде как ненаправленный топологический граф, на котором заданы переменные величины и параметры рассматриваемых физических процессов и который полностью определяет физическую взаимосвязь этих переменных через параметры.

Под морфологической расчетной моделью понимается математическая модель протекающих физических процессов, представленная в форме соединения многополюсников или ненаправленного морфологического графа (гиперграфа), определяющих способ построения рассматриваемого схемно-конструкторского решения аппаратуры из выделенных составных частей.

Под комбинированной моделью понимается такая модель, при построении которой использованы принципы построения нескольких из вышеперечисленных моделей.

Таким образом, осуществляя тот или иной вид моделирования, можно ограничиться общей связью входных и выходных переменных величин ЭС (аналитическая модель), рассмотреть причинно-следственные связи внутренних переменных физических процессов в аппаратуре (структурные модели), изучить конкретное физическое поле распределения его потенциальной переменной в дискретных точках схемы или конструкции (топологические модели), осуществить разделение физического процесса на составные части согласно закономерностям строения схемы или конструкции (морфологические модели).

При формализации любой тип физического процесса ЭС, например электрический, может быть представлен расчетной моделью любого из

перечисленных выше видов. Однако в каждом конкретном случае, как правило, предпочтительнее использовать определенный вид расчетной модели, с помощью которого нагляднее и проще всего изучить рассматриваемый физический процесс. Это позволяет для каждого вида расчетных моделей определить ту группу методов исследования параметрической чувствительности, которая опирается на данный вид расчетных моделей и может быть использована при решении задач проектирования ЭС.

В следующей главе будут разработаны детальные правила построения и характерные формы каждого унифицированного вида расчетных моделей ЭС. Здесь следует указать особо, что в каждом виде расчетных моделей можно рассматривать большое множество форм их представлений. На рис. 2.7 выделены только основные формы, которые можно наиболее эффективно применить при автоматизации проектирования ЭС. Выделенные формы позволяют охватить подавляющее число практических случаев конструкторско-технологических решений ЭС.

Увеличение количества видов и форм представления исходных расчетных моделей ЭС равносильно потере их унификации, что отрицательно может сказаться на эффективности применения компьютера для исследования параметрической чувствительности и решения конкретных задач.

Прежде чем перейти к детальному рассмотрению унифицированных моделей ЭС, определим принципы исследования их параметрической чувствительности, что позволит сформулировать ряд требований к формам представления исходных расчетных моделей и к методам получения ФЧ.

*Принципы исследования параметрической чувствительности ЭС.* Теоретические и практические исследования показывают, что для каждого вида исходных расчетных моделей ЭС могут быть применены одни и те же принципы получения ФЧ: непосредственного анализа исходной модели, построения дополнительных моделей, суммирования переменных величин тендем-модели, автономного анализа двух моделей. Концепция выделения принципов исследования параметрической чувствительности ЭС выдвинута в последнее время вследствие того, что в литературе, освещающей различные аспекты теории параметрической чувствительности в приложении к разнообразным техническим системам, наблюдается повторная разработка сходных методов получения ФЧ с незначительными отличиями, обусловленными главным образом осо-

бенностями рассматриваемых систем. Это затрудняет выбор методов для практических расчетов.

При конструировании ЭС приходится проводить исследования параметрической чувствительности электрических, механических и тепловых процессов как отдельных систем, что в силу их физической разнородности и особенностей расчетных моделей затрудняет рассмотрение преимуществ тех или иных методов получения ФЧ в конкретных условиях их применения. Кроме того, подмечая, что принцип получения ФЧ для различных методов, реализованных для разных видов расчетных моделей ЭС, одинаков, можно установить предпочтительный вид расчетной модели для конкретного случая исследования физического процесса в схеме или конструкции.

Четыре принципа исследования параметрической чувствительности, названные выше, позволяют охватить известные методы получения ФЧ для электрических схем электронной аппаратуры и разработать новые, более эффективные методы получения ФЧ электрических, механических, тепловых и других физических характеристик конструкций ЭС. Рассмотрим сущность указанных принципов.

Первый принцип, состоящий в том, что любые ФЧ могут быть получены путем непосредственного анализа исходной модели ЭС, условно изображен на рис. 2.8. Он отличается от остальных тем, что все искомые ФЧ находятся только по одной модели, в качестве которой берется исход-

ная расчетная модель, выдающая те же выходные характеристики ЭС, чувствительность которых исследуется.

Как будет видно ниже, при всех остальных исследованиях параметрической чувствительности для получения ФЧ необходимо строить специальные модели на основе исходной модели и в дополнение к ней. Такое усложнение исследований окупается снижением общей трудоемкости получения множества ФЧ. Это усложнение целесообразно также при получении ФЧ нескольких характеристик к одному параметру или век-

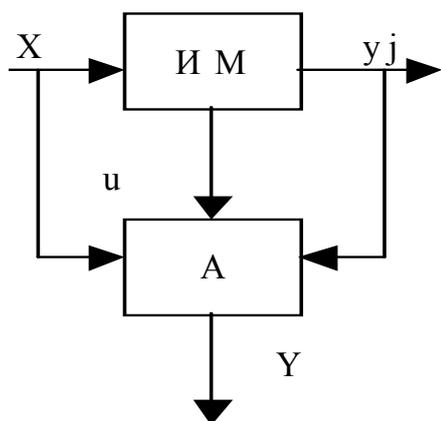


Рис. 2.8. Принцип непосредственного анализа исходной модели

тору чувствительности, т. е. набору ФЧ одной характеристики к нескольким параметрам.

Принцип непосредственного анализа исходной модели обладает преимуществами перед другими своей простотой и легкостью реализации на компьютере, так как в соответствии с этим принципом исследование параметрической чувствительности можно провести, имея только исходную расчетную модель ЭС, позволяющую получить рассматриваемую выходную характеристику. Никаких других моделей строить не нужно. Например, чрезвычайно простым является широко распространенный метод вариаций, относящийся к принципу непосредственного анализа исходной модели. Метод вариаций применим к любому виду исходной модели, поскольку сводится к поочередной вариации, т. е. малому изменению каждого параметра и регистрации соответствующих вариаций выходных характеристик. Функции чувствительности рассчитываются приближенно как отношения вариаций характеристик к вариациям параметров:

$$A_{qk}^{yj} \approx \Delta y_j / \Delta q_k .$$

Универсальность метода вариаций оборачивается потенциальной неточностью расчетов и значительной их громоздкостью при большом числе параметров. Чтобы уменьшить объем и повысить точность расчетов, а также одновременно исследовать поведение ЭС во всей области изменения параметров, переходят к методу планирования эксперимента, согласно которому одновременно изменяются несколько параметров на двух или трех уровнях в соответствии с принятым планом эксперимента.

При большом числе параметров и сложной модели ЭС метод планирования эксперимента оказывается также трудоемким и неэффективным, прежде всего по затратам времени на получение ФЧ. Для различных видов моделей более эффективными являются другие методы получения ФЧ, построенные тоже на принципе непосредственного анализа соответствующей исходной модели.

Если исходная модель аналитическая, то в зависимости от формы ее представления могут быть применены методы аналитического дифференцирования, таблицы чувствительности, передаточных операторов, частотных полиномов.

Топологические и морфологические методы получения ФЧ, представленные в этой главе и построенные на основе принципа непосредственного анализа исходной модели, называются методами соответственно исключения ветви и тестовых воздействий.

В некоторых проектных задачах при определенных формах представления аналитических, структурных, топологических и морфологических моделей ЭС более предпочтительными по простоте применения и затратам времени на исследование параметрической чувствительности оказываются методы, основанные на принципе построения дополнительных моделей. Этот принцип можно сформулировать следующим образом: любую ФЧ можно представить как выходную величину некоторой расчетной модели, дополнительно построенной и присоединенной к исходной модели так, что входные  $x$ , выходные  $y$  и некоторые промежуточные и переменные исходной модели  $ИМ$  служат входными переменными дополнительной модели  $ДМ$  (рис. 2.9).

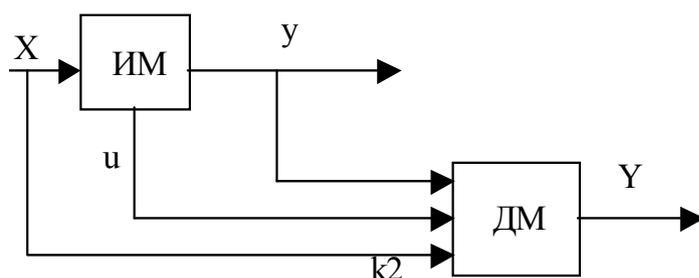


Рис. 2.9. Принцип построения дополнительных моделей ( $Y A_{q_k}^{y_j}$ )

Дополнительная модель может быть построена путем дифференцирования исходной модели по соответствующему параметру.

Некоторые методы, относящиеся к этому принципу, известны давно и сыграли положительную роль в развитии исследований и самой теории параметрической чувствительности. К таким методам относится метод уравнений чувствительности, который может применяться для аналитических моделей ЭС, представленных в неявной форме: в виде системы алгебраических или дифференциальных уравнений. Широкие возможности по исследованию параметрической чувствительности ЭС представляет принцип построения дополнительных моделей, реализованный в методах, предназначенных для применения при структурном моделировании фи-

зических процессов в схемах и конструкциях аппаратуры и в технологическом оборудовании. Дифференцирование исходной математической модели ЭС, заданной в структурном виде по рассматриваемому параметру, сразу же приводит к дополнительной модели, представляющей собой присоединенную собственную структуру исходной модели.

Все эти структурные методы расширяют возможности исследования параметрической чувствительности ЭС, так как позволяют получать ФЧ выходных характеристик к изменению передаточных операторов отдельных частей, на которые разделяются схемы, конструкции аппаратуры и технологические процессы.

Кроме того, принцип построения дополнительных моделей дает методы преобразованной модели и управляемых компонентов для топологических и морфологических расчетных моделей ЭС. Название первого метода отражает необходимость преобразования зависимых активных компонентов, а второго – необходимость введения управляемых компонентов при переходе от исходной модели к дополнительной. С целью повышения эффективности исследования параметрической чувствительности конструкций и технологии ЭС для некоторых форм исходных моделей разработан принцип суммирования переменных величин тандем-модели, по которому построены новые методы получения ФЧ. Сущность принципа можно проследить по рис. 2.10. Две одинаковые исходные модели *ИМ* соединяются последовательно в виде тандем-модели, суммирование векторов переменных величин  $U_1$  и  $U_2$  которой с соответствующими весовыми коэффициентами  $k_1$  и  $k_2$  дает искомые ФЧ. Для каждой ФЧ устанавливаются свои значения весовых коэффициентов на сумматорах 2. Способ расчета весовых коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  зависит от формы представления расчетных моделей ЭС и имеет определенную специфику в каждом методе получения ФЧ.

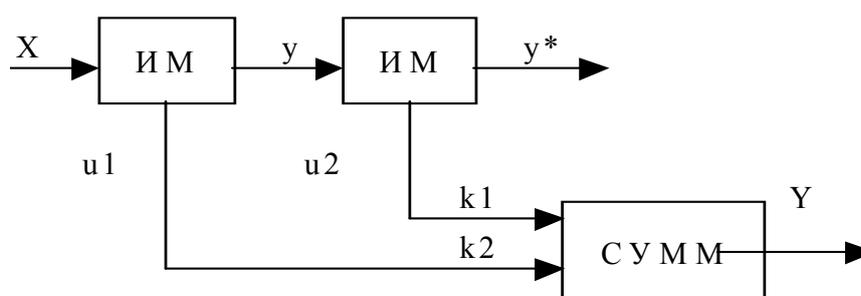


Рис. 2.10. Принцип суммирования переменных величин ( $U_1$  и  $U_2$ ) – тандем-модели ( $Y = A_{q_k}^{y_j}$ )

Идея принципа суммирования переменных величин тандем-модели появилась после изучения свойств методов получения ФЧ, основанных на рассмотренном выше принципе построения дополнительных моделей. Общим свойством большинства этих методов, а именно методов уравнений чувствительности, подсоединения собственной структуры, преобразованной модели и управляемых компонентов, является построение новой дополнительной модели для получения ФЧ по каждому новому параметру, причем все дополнительные модели в одном методе по конфигурации идентичны друг другу и исходной модели.

При линейной исходной модели ЭС все отличие дополнительных моделей друг от друга и от исходной модели сводится к назначению новых мест приложения входных воздействий. Поэтому уже в методе операторов чувствительности, позволяющем реализовать принцип построения дополнительных моделей для структурных исходных моделей ЭС, использована возможность выделения общей части дополнительных моделей. В указанном методе дополнительная модель представляет собой второй экземпляр исходной модели с той же точкой приложения входного воздействия, но с добавочными операторами, подключаемыми к выходу второго экземпляра при последовательном соединении дуг модели или к специально выделяемым внутренним точкам на нем при наличии общей обратной связи в модели. Таким образом, для получения  $L$  ФЧ требуется  $L$  раз суммировать переменные величины операторов чувствительности. В тех случаях, когда дополнительные операторы получаются простыми, указанный метод эффективен и по трудоемкости.

Для дальнейшего повышения эффективности исследования параметрической чувствительности ЭС одна из задач теории и была связана с разработкой таких методов получения ФЧ, в которых достаточно было бы иметь тандем-модель, т. е. две совершенно одинаковые, последовательно соединенные модели, каждая из которых воспроизводит рассматриваемый процесс ЭС, а искомые ФЧ рассчитывались бы по принципу весового суммирования переменных величин тандем-модели без дополнительных операторов чувствительности. Указанная задача имеет решение для всех видов моделей ЭС: аналитического (методы совмещенного моделирования и суммирования интегралов), структурного (метод базовых переменных

величин), топологического (метод независимых потенциалов), морфологического (метод компонентных переменных величин).

Рассмотрим четвертый принцип исследования параметрической чувствительности ЭС – принцип автономного анализа двух моделей, – состоящий в том, что для получения ФЧ выходной характеристики необходимо автономно проанализировать две модели: исходную модель ИМ ЭС при заданных входных воздействиях и смежную модель СМ, не присоединенную к исходной, но построенную из исходной путем ее изменения по определенным правилам и рассматриваемую при тестовом (в частном случае—единичном) воздействии со стороны выхода. Искомые ФЧ рассчитываются как взвешенные произведения соответствующих переменных  $V_1$  и  $V_2$  обеих моделей. Правила построения смежной модели и формулы вычисления ФЧ зависят от вида исходной модели, рассматриваемой выходной характеристики и внутренних параметров.

На рис. 2.11 дана иллюстрация принципа автономного анализа двух моделей, где через  $\alpha$  обозначен вектор весовых коэффициентов, а через 1 – тестовое воздействие.

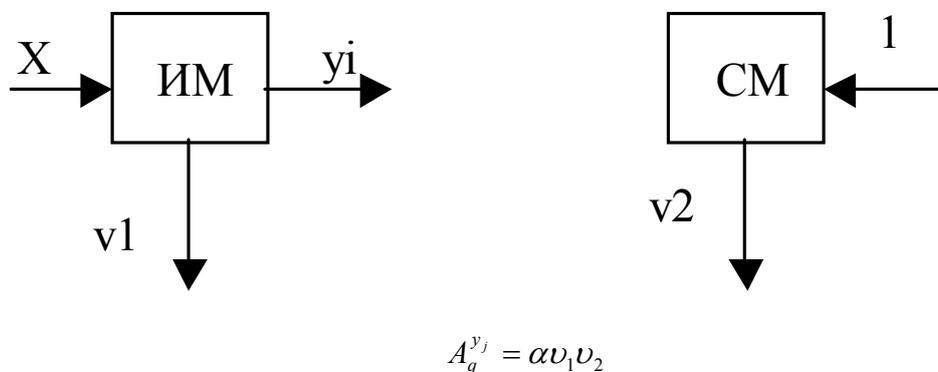


Рис. 2.11. Принцип автономного анализа двух моделей

В настоящее время большое распространение для получения ФЧ при автоматизированном проектировании электрических схем аппаратуры получил так называемый метод присоединенной цепи, построенный на принципе автономного анализа двух моделей и применяемый к топологическим моделям ЭС, представленным в форме эквивалентных электрических цепей. Данный метод развит для топологических моделей в унифицированной форме ненаправленных графов, позволяющих по единым

программам исследовать параметрическую чувствительность как электрических, так и механических и тепловых характеристик ЭС. Все методы исследования параметрической чувствительности ЭС, основанные на принципе автономного анализа двух моделей, наиболее эффективны при получении вектора чувствительности, т. е. ФЧ одной выходной характеристики аппаратуры к изменению множества ее параметров. Трудоемкость реализации рассматриваемого принципа определяется в первую очередь видом исходной расчетной модели ЭС и рассматриваемой выходной характеристики. В частотной области реализация принципа менее трудоемка по сравнению с временной областью.

Таким образом, введенные в настоящем параграфе принципы исследования параметрической чувствительности ЭС охватывают практически все ранее известные и новые применяемые в теории надежности ЭС методы получения ФЧ и позволяют построить строгую теорию параметрической чувствительности конструкций и технологических процессов. В то же время известно, что возможности реализации того или иного принципа исследования параметрической чувствительности во многом определяются видом, формой и свойствами исходной расчетной модели ЭС. С другой стороны, в зависимости от поставленных задач проектирования ЭС определяется совокупность характеристик и параметров, рассматриваемых в исследованиях чувствительности, что позволяет выбрать такие принципы исследования, которые ведут к наименьшей трудоемкости проектных расчетов. В таких условиях вид исходных расчетных моделей ЭС почти однозначно определяет выбор методов получения ФЧ, реализующих выбранные принципы исследования.

---

---

### 3. НЕСУЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭС И ИХ ЭВОЛЮЦИЯ

---

---

#### 3.1. Основные требования к несущим конструкциям и механизмам ЭС

*Прочность и жесткость конструкций.* Все детали механизмов и механических узлов, которые относятся к несущим конструкциям, должны быть сконструированы так, чтобы они полностью удовлетворяли техническому заданию и изготавливались при наименьших затратах. К деталям механизмов, механическим узлам и изделию в целом предъявляют следующие *требования: прочность, жесткость, точность, износостойкость, надежность, технологичность.* Детали механизмов и механические узлы, используемые в качестве несущих конструкций, кроме того, должны обеспечивать теплоотвод, электропроводность и экранирование от внешних и собственных внутренних электромагнитных полей.

*Прочность.* Под прочностью понимают способность детали или изделия под действием нагрузок сопротивляться разрушению любого вида. Различают *объемную* прочность, которая характеризуется наличием в детали точек, испытывающих напряженное состояние и находящихся на значительном расстоянии друг от друга и от места приложения внешней нагрузки, и *контактную, или поверхностную, прочность,* определяемую напряженным состоянием малого объема детали, непосредственно прилегающего к месту приложения силы (случай контакта двух тел с передачей нагрузки в точке или по линии контакта). При недостаточной объемной прочности наступает поломка детали, а при недостаточной контактной прочности происходит изъязвление поверхности (питтинг). Если нагрузки создают в детали переменные во времени напряжения, то говорят об *усталостной или циклической* прочности.

Несущие конструкции типа плат, панелей, шасси, каркасов стоек и рам, работающих в условиях вибраций, должны удовлетворять также тре-

бованию вибропрочности. Для связной, широкополосной, измерительной ЭС характерным являются малые нагрузочные моменты, так как при работе обычно преодолеваются только силы трения во вращательных и поступательных парах. Существовало мнение, что прочностных расчетов таких деталей можно не делать или рассчитывать их только на статическую прочность и жесткость. Однако для ЭС, устанавливаемой на борту летательных аппаратов, следует учитывать перегрузки от линейных ускорений, вибраций и ударов. Ускорения при этих видах воздействий зависят от типа объекта, места расположения аппаратуры в нем и могут достигать для некоторых типов самолетной и ракетной аппаратуры до 10...15 g и более. При перегрузках необходим расчет на прочность механических деталей ЭС. При расчете кроме статических нагрузок нужно учитывать нагрузки от сил инерции. Некоторые детали работают на изгиб с кручением. В этом случае коэффициент запаса прочности определяют по формуле

$$n = \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} \geq [n],$$

где  $n_{\sigma}$  и  $n_{\tau}$  – коэффициенты запаса прочности по нормальным и касательным напряжениям.

Запасы прочности по нормальным и касательным напряжениям определяются по формулам:

$$n_{\sigma} = \sigma'_{rN} / \sigma ;$$

$$n_{\tau} = \tau'_{rN} / \tau ,$$

где  $\sigma'_{rN}$  и  $\tau'_{rN}$  – предельные нормальные и касательные напряжения для расчетного сечения детали (для цикла с характеристикой  $r$  и при расчетном числе циклов нагружений  $N_p$ ).

Расчет на вибропрочность несущих конструкций типа платы сводится к определению наибольших напряжений исходя из вида деформации, вызванной действием вибраций в определенном диапазоне частот, и сравнением полученных значений с допустимыми.

Этот расчет можно свести к нахождению собственной частоты колебаний  $f$ , при которой плата с определенными размерами и механическими

характеристиками имеет прогибы и напряжения в пределах допустимых значений. При этом частота колебаний платы не должна быть близка к ее резонансной частоте  $f_0$ .

Для расчета частоты собственных колебаний платы с расположенными на ней микросхемами, резисторами и прочими ЭРЭ существенным является выбор характера ее крепления по контуру.

Если принять плату ТЭЗа с размещенными на ней ЭРЭ за пластину с определенным типом заделки по контуру, то частота ее собственных колебаний

$$f = 10^5 \cdot K_M \cdot K_B \cdot B \cdot h / a^2 \text{ [Гц]},$$

где  $K_M$  – коэффициент, учитывающий влияние материала платы;  $K_B$  – коэффициент, учитывающий влияние массы расположенных на плате элементов;  $B$  – частотная постоянная;  $h$  – толщина платы;  $a$  – длина платы. Коэффициент

$$K_B = \frac{1}{\sqrt{1 + M_{\text{Э}} / M_{\text{П}}}},$$

где  $M_{\text{Э}}$  – масса элементов, равномерно размещенных на плате;  $M_{\text{П}}$  – масса платы.

Значения  $K_B$  для различных соотношений  $M_{\text{Э}}/M_{\text{П}}$  даны в соответствующих таблицах.

Частотная постоянная  $B$  зависит от вида закрепления платы по контуру и соотношения размеров сторон  $a$  и  $b$ .

Физико-механические характеристики материалов деталей, применяемых в несущих конструкциях, приведены в соответствующих таблицах.

Наиболее благоприятным распределением частот среди группы деталей является возрастание собственной частоты от детали, непосредственно воспринимающей колебания, к следующим, последовательно с ней соединенным, при отношении частот не менее 1,5—2.

Согласно ОСТ 4Г0.010.009, печатные платы с ЭРЭ в ЭС без амортизации не должны иметь резонансных частот до 60 Гц, а с амортизацией— менее 1,5 фв, где фв—частота колебаний блока на амортизаторах.

*Жесткость.* Под жесткостью понимают способность детали под действием нагрузки сопротивляться образованию деформации выше допус-

тимых значений. Расчет на статическую жесткость сводится к определению линейных  $f$  и угловых  $\Theta$  прогибов и сравнению их с допустимыми значениями, которые выбирают из условия выполнения изделием своих функций.

Это свойство важно для таких деталей ЭС, как валы и оси, платы, рамы, стойки, каркасы и др. Так, недостаточная статическая жесткость валов и осей может являться причиной потери точности механизма, а недостаточная жесткость платы – отказа ТЭЗа или электронного узла (блока), в стойке которого он размещается. При воздействии на ЭС вибраций недостаточная жесткость платы может являться причиной плохой виброжесткости конструкции.

*Точность конструкций.* Под точностью понимают свойство механизма обеспечивать в допустимых пределах погрешности положения и перемещения ведомых звеньев при определенных законах движения ведущих звеньев. Точность механизма обеспечивается за счет снижения погрешностей линейных размеров и взаимного расположения звеньев, а также погрешностей формы кинематических пар, снижения деформаций и износа.

Во многих случаях точность работы радиотехнических приборов, устройств и установок зависит от точности работы входящих в них механизмов. Нарушение их точности вызывается тем, что при изготовлении деталей механизмов и их сборке, а также в процессе эксплуатации происходит искажение размеров и формы звеньев, изменяется характер сопряжений в кинематических парах; при работе механизмов от передаваемых нагрузок и внешних воздействий могут возникать деформации деталей. Все эти явления вызывают изменение кинематики и динамики механизмов, влияют на их точность.

Вопросы исследования и оценки точности являются сложными задачами и решаются с использованием методов расчета точности кинематических цепей (ГОСТ 21098—75), математической статистики и метрологии с учетом технологии производства и условий эксплуатации.

*Технологичность конструкций.* Под технологичностью конструкции понимают использование таких конструктивных решений деталей, узлов и изделия в целом, которые обеспечивают наиболее быстрое и экономичное освоение изделия в производстве путем применения высокопроизводи-

тельных и наиболее прогрессивных способов формообразования с минимальными затратами рабочей силы.

*Технологичная* конструкция позволяет рационально использовать производственное оборудование и материалы, не требует сложной подготовки производства, позволяет осуществить автоматизацию производственных процессов и контроль при выпуске. Технологичность конструкций тесно связана с серийностью: изделие, изготовленное в условиях мелкосерийного производства, для крупносерийного может оказаться нетехнологичным.

Технологичные конструкции ЭС должны обеспечивать широкое внедрение стандартизации, нормализации и унификации деталей, полуфабрикатов, материалов, а также типизацию технологических процессов.

### **3.2. Конструкционные материалы несущих конструкций и механизмов ЭС**

*Требования к конструкционным материалам.* Выбор материала деталей несущих конструкций и механизмов ЭС зависит от назначения и условий эксплуатации, определяющих эксплуатационные и технологические требования к материалу изделия, выполнение которых должно обеспечивать возможность применения наиболее прогрессивных видов формообразования.

Эксплуатационные требования к материалу изделия зависят от условий их работы в механизме. Их выполнение определяется свойствами материала, основными из которых являются:

- 1) *объемная или поверхностная прочность* с учетом таких механических характеристик, как предел прочности  $\sigma_B$ , предел текучести  $\sigma_T$ , условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , предел выносливости  $\sigma_{-1}$ , твердость по Бринеллю НВ или Роквеллу HRC;
- 2) жесткость, характеризуемая модулем упругости  $E$ ;
- 3) упругость, определяемая пределом упругости  $\sigma_y$ ;
- 4) ударная вязкость, зависящая от удельной работы, затрачиваемой на разрушение образца определенного поперечного сечения;
- 5) износостойкость с учетом твердости поверхности НВ (HRC) и допустимого для данного материала удельного давления [Р];

- 6) антифрикционность, характеризуемая коэффициентом трения скольжения  $f$ ;
- 7) коррозионная стойкость;
- 8) плотность  $\rho$ ;
- 9) удельные механические характеристики ( $\sigma_B/\rho$ ,  $\sigma_T/\rho$ ,  $\sigma_{0,2}/\rho$ ,  $\sigma_{-1}/\rho$ );
- 10) электропроводность, теплопроводность, магнитные характеристики и др.

*Технологические требования* к материалу характеризуют возможность изготовления изделия в производственных условиях с оптимальной трудоемкостью. Они сводятся при обработке давлением к пластичности, при изготовлении литьем – к хорошим литейным качествам, при обработке резанием – к хорошей обрабатываемости в сочетании с возможностью изменения механических характеристик и свойств материала за счет применения термической и термохимической обработок.

*Экономические требования* к материалу изделия определяются его себестоимостью и дефицитностью, так как в стоимость изделия входят стоимость материала и все производственные затраты, идущие на его изготовление. Ввиду различных затрат на подготовку и изготовление такие технологические процессы обработки материала, как штамповка, литье под давлением, прессование, экономически выгодны только для массового и крупносерийного производства и нерентабельны для индивидуального и мелкосерийного из-за больших затрат на оснастку.

*Методы термической и химико-термической обработки.* Термическая обработка деталей ЭС может изменить механические свойства материала: увеличить прочность и твердость, улучшить пластичность, повысить износостойкость, улучшить структуру материала. При термической обработке детали происходит ее нагрев до определенной температуры, выдержка и последующее охлаждение.

При изготовлении деталей ЭС используют *отжиг, нормализацию, закалку (объемную и поверхностную), отпуск, старение, цементацию, азотирование, цианирование.*

*Отжигу* подвергают детали, получаемые с помощью литья и сварки (корпусы, рамы, стойки и т. д.). В результате этого улучшается однородность структуры, уменьшается твердость и снимаются внутренние напряжения.

*Нормализацию* осуществляют для понижения поверхностной твердости и снятия внутренних напряжений, возникших в результате различных видов пластической деформации:ковки, резания и т. д. Нормализация занимает промежуточное место между отжигом и закалкой.

*Закалку* применяют для стальных деталей, содержащих не менее 0,3 % углерода с целью повышения *твердости, прочности и изменения* структуры материала. Закалка повышает механические характеристики валов, шестерен, кулачков, пальцев и других деталей. Для получения светлой и блестящей поверхности у легированных сталей осуществляют светлую закалку—нагрев детали в среде диссоциированного аммиака. Кроме того, применяют закалку ТВЧ (токи). Предельное значение получаемой твердости HRC=60...65.

*Отпуску* подвергают детали, прошедшие закалку. *Цель отпуска* - снятие внутренних напряжений, повышение пластичности и вязкости при сохранении достаточно высоких механических характеристик. Различают три вида отпуска – высокий, средний, низкий.

*Высокий отпуск, или термоулучшение* ( $t_{\text{отп}}=550...650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), производят для получения наибольшей вязкости при достаточно высоких пределах прочности. Термоулучшению подвергаются углеродистые стали марок (40, 50, 50Г), легированные – марок (40Х, 40ХН, 38Х2МЮА, 35ХГСА).

*Средний отпуск* ( $t_{\text{отп}}=350...500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) используют для получения структуры, обладающей повышенными пределами прочности, выносливости и твердости.

*Низкий отпуск* ( $t_{\text{отп}}=550...650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) применяют для снятия внутренних напряжений при сохранении структуры закалки.

*Старение* производят для стабилизации свойств и размеров детали после отливки, сварки или проката, а также после термической обработки. Старение заключается в длительном выдерживании детали в течение 50...90 ч при низкотемпературном нагреве (искусственное старение) или комнатной температуре (естественное старение). Старению могут подвергаться стальные детали типа станин, корпусов, рам, а также детали из сплавов цветных металлов.

*Цементация* – насыщение поверхностного слоя стали углеродом для увеличения в процессе последующей закалки поверхностной твердости. Цементации подвергают стали, содержащие менее 0,2% углерода. Толщину

цементированного слоя выбирают в зависимости от размера детали; она может доходить до 1,5 мм. После цементации и закалки несколько искажаются форма, размеры и состояние поверхности детали, поэтому в дальнейшем ее следует подвергнуть дополнительной механической обработке.

*Азотирование* (поверхностное насыщение азотом) применяют для деталей, изготовленных из легированных сталей (обычно с примесью алюминия), чтобы получить твердую (до HRC=65...70) износо- и коррозионно-стойкую поверхность. Толщина слоя незначительна (несколько десятков микрон) при почти полном отсутствии искажения размеров.

*Цианирование* используют для повышения поверхностной твердости деталей за счет насыщения поверхности углеродом и азотом в цианистых солях.

При конструировании деталей, проходящих термообработку, необходимо:

- а) выбирать марку материала в соответствии с требованиями к детали и видом термической или химико-термической обработки;
- б) делать плавные переходы от одного сечения к другому с максимально большим радиусом галтелей;
- в) изготавливать детали сложной конфигурации из легированной стали как менее деформируемой при закалке;
- г) оставлять резьбу сырой;
- д) снимать фаски в деталях с острыми кромками для снижения концентрации напряжений.

Корпусы и корпусные детали механизмов. Корпусы и корпусные детали ЭС используют для закрепления всех подвижных и неподвижных частей механизма; они обеспечивают правильное взаимное расположение всех деталей устройства, воспринимают действующие нагрузки, защищают внутреннюю полость от загрязнения, способствуют созданию жесткой и надежной конструкции.

Механизмы ЭС в зависимости от своего расположения на объекте и функционального назначения могут выполняться как самостоятельные устройства, на которые действует весь комплекс климатических воздействий, так и в виде отдельных узлов ЭС.

К корпусным деталям относятся корпуса редукторов привода антенн наземных и самолетных РЛС, корпуса приемопередатчиков, следя-

щего привода, измерительных приборов, отсчетных устройств, бортовых ЭВМ и др.

Требования, предъявляемые к конструкциям корпусов и корпусным деталям, зависят от назначения, условия эксплуатации, конструктивной и компоновочной схем, места установки на объекте и ряда других факторов. Основные требования сводятся к следующему:

- а) удобству сборки, регулировки и эксплуатации изделия;
- б) оптимальным габаритам и массе конструкции;
- в) прочности, жесткости и надежной защите деталей от пыли, влаги, механических воздействий;
- г) обеспечению необходимой точности расположения деталей;
- д) технологичности изготовления.

Выполнение большинства перечисленных требований обеспечивается правильным выбором конструктивной схемы, материала, размеров стенок, расположения ребер жесткости, приливов, метода формообразования и т. п.

Для фиксации положения одной детали корпуса относительно другой используются штифты, центрирующие – заточки, выступы, впадины. Присоединительные места и места разъема обычно имеют утолщенные латки. В местах размещения подшипников корпус имеет приливы в виде бобышек.

Цельный корпус создает затрудненную сборку и применяется редко. В редукторах малой мощности используют корпуса с разъемом поперек осей валов; корпуса одно- и двухплатные требуют специального пыле- и влагозащитного устройства и должны быть встроены в общий защитный кожух или корпус.

Сборный корпус применяют в макетных, мелкосерийных и единичных конструкциях, когда изготовление цельного или разъемного корпуса нерентабельно. Такой корпус состоит из отдельных деталей, соединяемых с помощью винтов и фиксируемых штифтами.

Корпусные детали изготавливают литьем, прессованием, штамповкой, сваркой; детали сборных корпусов предварительно подвергают механической обработке.

Для литых корпусных деталей в мощных редукторах наземных конструкций ЭС используют чугун (марок СЧ21–40 и СЧ15–732). Для произ-

водства малогабаритных корпусных деталей литьем применяют силумины (АЛ2, АЛ4 и АЛ9, магниевые сплавы, МЛ3, МЛ5; МЛ9); в отдельных случаях их изготавливают из бронзы и латуни.

При проектировании литого корпуса необходимо выдерживать равномерную толщину стенок, переходы от тонких стенок к приливам делать плавными, без резких изменений сечения, обрабатываемые поверхности относительно необрабатываемых для улучшения условий обработки следует выставлять с учетом припуска на обработку на 2...6 мм и делать по возможности на одной высоте. Элементы литого корпуса должны иметь соответствующие литейные уклоны.

Толщина стенок корпуса должна быть по возможности наименьшей; она выбирается исходя из габаритов, метода литья и материала конструкции. Достижение необходимой прочности и жесткости корпусной детали обеспечивается выбором материала, применением ребер жесткости, местных приливов и утолщений (бобышек), особенно по плоскости разъема и в местах установки электродвигателя и подшипников. В силовых механизмах ЭС малой и средней мощности (до 1 кВт) толщину стенки при изготовлении литьем из легких сплавов берут в пределах 3...5 мм, для кинематических механизмов и механизмов приборного типа – 1,5...3 мм. Литье под давлением позволяет получать высокое качество поверхности детали без дополнительной обработки с шероховатостью по 9–10-му классам и высокой точностью размеров. Деталь повторяет геометрию и микрорельеф поверхности пресс-формы). При литье в оболочковую форму (по выплавляемым моделям) могут быть получены детали с шероховатостью по 5–7-му классам.

Малогабаритные корпусные детали могут изготавливаться прессованием из пластмасс: феноллата, аминоллата, композиционных пластмасс. Их достоинствами являются стойкость, высокие электроизоляционные свойства, малая масса и стоимость.

Форма прессованных корпусных деталей не должна препятствовать свободному течению массы при заполнении ею пресс-формы, поэтому следует стремиться к упрощению формы детали. Плоские поверхности высотой более 5...6 мм должны иметь технологические уклоны.

Для повышения жесткости и прочности пластмассу можно армировать сеткой или проволокой. Места переходов от меньшего сечения к

большому следует выполнять с помощью радиусов закруглений и уклонов. По конструктивным соображениям стенки деталей следует утолщать при наличии отверстий, приливов, ступиц с канавкой, поясков и буртиков, рифлений и др. Для упрочнения торцов детали используют буртики, а для повышения жесткости – ребра жесткости. Оптимальная их толщина – 0,6...0,8 толщины сопрягаемой стенки. При прессовании в детали может быть установлена металлическая арматура (штифты, винты, втулки и др.).

Металлические штампованные детали корпуса изготавливают с помощью вырубки, гибки и вытяжки из листа и полос. Их соединяют винтами, сваркой, пайкой, склеиванием.

Для изготовления деталей сварных корпусов используют листовую и профильную сталь, сплавы алюминия. Свариваемые детали могут предварительно подвергаться гибке и объемной штамповке. Обычно производят аргонодуговую сварку, а в отдельных случаях, для тонких деталей, используют контактную сварку. Для снятия внутренних напряжений после сварки корпуса подвергают отжигу.

Детали сборных корпусов изготавливают из листа; они имеют существенный недостаток – большой объем механической обработки.

Высокую точность размеров между отверстиями в корпусе обеспечивают расточкой по координатам, сверлением по кондуктору и шаблонам. Расточка по координатам дает наивысшую точность и производится на координатно-расточных станках. Предельные отклонения межосевых расстояний  $f$  в корпусе под валы зубчатых колес регламентированы. Места под головки винтов, болтов, гаек в виде приливов или бобышек обрабатывают по 4-му или 5-му классу, стыковочные и установочные поверхности – по 5–8-му, а посадочные поверхности под подшипники, являющиеся опорами валов, – по 6–9-му классам шероховатости. Наружные поверхности корпуса защищают лакокрасочным покрытием с предварительной грунтовкой и шпаклевкой, внутреннюю поверхность корпуса грунтуют.

Защита механизма в корпусе от попадания пыли обеспечивается при частичной герметизации фетровыми, манжетными, лабиринтными уплотнениями, для стыковочных мест – прокладками из резины и пластмасс. Для герметичных корпусов применяют резиновый шнур, резиновые прокладки, паяный шов.

### 3.3. Методы проектирования механизмов

*Моноблочный и функционально-узловой (модульный) методы проектирования.* При проектировании механизмов ЭС одним из основных этапов работы является решение задачи компоновки конструкции. Нахождение оптимального решения является сложным процессом, в ходе которого используется опыт, накопленный при создании аналогичных конструкций ЭС различного назначения. При этом решение может быть как в виде *моноблочной конструкции* со сложными функциональными связями, так и в виде комплекса отдельных конструктивно-законченных единиц – *модулей*, выполняющих отдельные строго ограниченные функции. *Модульная* компоновка в сочетании с *функционально-узловым методом (ФУМ)* проектирования, в основе которого лежит принцип деления принципиальных электрических и кинематических схем на отдельные функциональные и конструктивно-законченные сборочные единицы, нашла в настоящее время широкое применение. *Модульная компоновка* обеспечивает: свободу доступа к составным частям конструкции; удобство совершенствования отдельных узлов изделия; хорошую ремонтпригодность.

Разработка электромеханизмов ЭС в виде моноблочной конструкции со сложными функциональными, электрическими и кинематическими связями является сложной задачей и требует для своего решения значительного времени. Ее упрощенное решение можно найти, что особенно важно при разработке макетных и опытных конструкций, путем использования модулей, близких друг к другу по габаритам и имеющих однотипные присоединительные размеры. Такими *электромеханическими модулями (ЭлММ)* могут быть универсальные редукторы с широким набором передаточных чисел и передаваемых крутящих моментов, муфты различных типов, электродвигатели, потенциометры, сельсины и другие узлы. Создание и применение при конструировании электромеханических узлов ЭС ЭлММ является одним из методов, позволяющих повысить надежность, упростить проектирование, настройку и макетирование изделия, сократить сроки разработки и изготовления.

Система электромеханических модулей (ЭлММ) представляет собой набор функциональных электромеханических узлов, заключенных в однотипные корпуса с одинаковыми присоединительными размерами, а также

соединительные муфты и стаканы. Корпусы ЭлММ выполняют в виде параллелепипеда или тела вращения.

При использовании в узле комплектующих изделий (двигателей, потенциометров, сельсинов и т. д.) их соединение с другими ЭлММ выполняют с помощью стаканов.

Разработаны и применяют следующие основные группы ЭлММ:

- зубчатые цилиндрические колеса;
- редукторы и мультикаторы;
- дифференциальные, соединительные и сцепные муфты;
- ограничительные и установочные механизмы;
- стаканы.

*Зубчатые цилиндрические* колеса служат в качестве звена при передаче вращения от привода к исполнительным механизмам.

*Редукторы и мультипликаторы* изменяют частоты вращения и крутящие моменты. Технические данные: момент трогания – не более 0,1 Н/мм, мертвый ход на выходном валу редуктора при максимальном моменте – не более 1 °, передаточное число в зависимости от числа ступеней  $u=22,2 \dots 48220$ . Редукторы предназначены для двигателей (типа ДИД и ДГ). Редуктор соединяется с ЭлММ через переходной стакан.

*Дифференциалы* предназначены для механического сложения и вычитания угловых скоростей двух валов.

*Соединительные муфты* обеспечивают согласование соединяемых валов при регулировке механизма с помощью дополнительного передаточного механизма на одной из полумуфт. Муфты бывают постоянные, без механизма согласования и с ним. В качестве постоянных соединительных муфт используют крестовые и поводковые.

*Сцепные муфты* с электромагнитным управлением выполняют функции расцепления, переключения и сцепления валов.

*Ограничительные механизмы* состоят из механизма возврата и предохранительного механизма. Механизм возврата служит для возврата вала потенциометра или другого устройства в исходное или нулевое положение с помощью пружины кручения. Предохранительный механизм ограничивает угол поворота за счет размыкания электрической цепи привода с помощью микропереключателя и кулачкового механизма.

*Установочные механизмы* состоят из программного механизма, предназначенного для получения различных по времени электрических импульсов, и механизма согласования, обеспечивающего угловое смещение валов.

*Стаканы* служат для соединения в функциональный узел комплектующих оригинальных и электромеханических узлов и крепления их к плате прибора. Различают стаканы соединительные и переходные. Первые служат для соединения ЭлММ между собой, вторые – для крепления внутри себя универсального редуктора, вращающегося трансформатора, сельсина или потенциометра. Подобным образом могут быть разработаны и другие группы электромеханических модулей.

Метод проектирования электромеханических систем с помощью ЭлММ заключается в разработке функциональной схемы системы в соответствии с заданием; составлении кинематической схемы по разработанной функциональной схеме и вычерчивании общего вида системы по кинематической схеме и подобранных из каталога модулей.

После расчета основных технических параметров устройства разрабатывают функциональную и кинематическую схемы, а также ее конструкцию, согласно которым производят сборку.

Назначение механизмов. Современные ЭС представляют собой комплекс взаимосвязанных электронных, радиотехнических, электромеханических и механических устройств, в которые могут входить также устройства управления, индикации и контроля.

Между входящими в ЭС устройствами, часто выполняемыми в виде отдельных блоков, имеют место механические и немеханические виды связей.

Механизмы и механические узлы, которым свойственны механические связи, являются составной частью большинства ЭС. Они входят в состав механизмов настройки и отсчета бытовой и измерительной аппаратуры, дистанционных передач и синхронно-следающих систем, а также приводов антенных блоков самолетных и корабельных радиолокационных станций (РЛС), приводов антенн и систем слежения за искусственными спутниками Земли (ИСЗ) и другими космическими аппаратами.

Механизмы настройки позволяют обеспечивать работу радиоаппаратуры в соответствующем диапазоне частот. Механизм настройки осуще-

ствяет перемещение элемента настройки на определенную величину с определенной точностью за счет наличия редукции с необходимым передаточным отношением.

Применение в ЭС дистанционного управления расширяет возможности управления различными механизмами, позволяя осуществлять эту функцию на расстоянии, размещать аппаратуру на объекте, в любом месте, централизовать управление несколькими видами аппаратуры с одного места.

Синхронно-следающие системы ЭС, обеспечивающие передачу в одном случае синхронного движения сигналов с пульта управления на механизмы дистанционной настройки ЭС, в другом – слежение за объектом с помощью перемещения в пространстве различного типа антенных устройств, также в определенной части содержат механизмы и механические узлы, способствующие выполнению этими устройствами заданных функций.

Механизмы и механические узлы содержат отсчетные устройства, широко применяемые в измерительных приборах, а также устройства записи и воспроизведения информации, обеспечивающие перемещение носителя информации.

Аппаратура, используемая на ИСЗ, космических кораблях и орбитальных станциях, располагается в гермокабинах или вне их, причем антенны располагают вне объекта.

На современных самолетах и вертолетах большинство блоков ЭС обычно размещают в специальном радиоотсеке, который располагается в носовой части фюзеляжа или за кабиной пилота.

При компоновке отдельные комплексы и объекты ЭС выполняют в виде стоек и шкафов, состоящих из отдельных блоков, приборов и устройств; одной из разновидностей стойки или шкафа является конструкция пульта. Входящие в эти объекты блоки и приборы обычно имеют законченное конструктивное исполнение и состоят из конструктивных модулей более низкого уровня (функциональных узлов, ячеек, микросборок с различного типа устройствами управления и регулировки). Таким образом, конструкциям ЭС свойствен модульный принцип построения, причем иерархически конструктивный модуль низшего уровня является составной частью конструктивного модуля более высокого уровня.

Достоинствами входящих в ЭС механических устройств являются их высокая надежность, простота конструкции и эксплуатации. Для механи-

ческих устройств по сравнению с электронными узлами и блоками необходимо меньшее число регулировок и не требуется контроль параметров, которые более стабильны во времени. Однако механические устройства имеют большую массу, в узлах механизмов возникают трение и износ, понижающие с течением времени точность изделия и способные вызвать отказ. Кроме того, механическим узлам свойственна инерционность: этот недостаток становится часто большим препятствием при использовании их в быстродействующих устройствах. Рациональное сочетание в ЭС электронных и механических устройств позволит создать системы, в которых будут устранены недостатки этих устройств.

Классификация типовых механизмов. Механизмы, используемые в ЭС, работают в различных режимах нагружения; они имеют различные показатели по точности, прочности, массе, габаритам, что определяется их местом в изделии и назначением.

Для рассмотрения особенностей конструкций и расчета механизмов ЭС необходимо разбить их на отдельные группы по какому-либо определенному признаку.

Исходя из функциональных особенностей работы, механизмы ЭС можно объединить в следующие группы:

- 1) механизмы приводов радиолокационных, связных, пеленгационных и других видов антенн;
- 2) механизмы дистанционных передач;
- 3) механизмы следящих систем;
- 4) механизмы ручной настройки;
- 5) механизмы электромеханической настройки;
- 6) отсчетные механизмы;
- 7) механизмы перемещения носителя информации в устройствах магнитной записи и воспроизведения.

Механизмы каждой группы имеют свои особенности как с точки зрения конструкции, так и передаваемых нагрузок и характера движения.

1. Механизмы приводов различных видов антенн составляют самый широкий класс механизмов, обеспечивая антенне определенный режим движения. Так, в самолетных РЛС зеркало и излучатель могут перемещаться по азимуту и углу места с одновременной стабилизацией по крену. Движение по азимуту и углу места свойственно также зеркалам наземных

и корабельных РЛС, радиоастрономических и радиосвязных систем и космических аппаратов. Наибольший размер зеркала наземных и корабельных РЛС составляет несколько метров, а мощность привода – несколько киловатт. Антенные блоки этих станций размещаются на специальных башнях, кабинах, платформах, палубах или мачтах. Зеркала радиоастрономических систем (радиотелескопы), радиосвязных (станция «Орбита») и подобных им систем имеют многометровые габариты зеркал и более мощный, чем у наземных РЛС, привод.

Механизмы приводов различного вида антенн, как силовые, должны удовлетворять требованиям прочности, долговечности и надежности; вместе с тем для снижения погрешности определения положения объекта при наведении к ним предъявляют повышенные требования по точности изготовления узлов и сборки.

2. К механизмам дистанционных передач можно отнести систему, состоящую из редуктора антенного блока с передаточным числом  $n - 1$  и вращающихся трансформаторов ВТ, электрически связанных с блоками развертки индикаторных устройств пилота и штурмана. Эта связь обеспечивает дистанционную передачу угла поворота зеркала антенного блока РЛС по азимуту на экран индикаторного устройства.

3. В механизмы следящих систем входят приводы систем автоматического сопровождения (САС), рулевые приводы, приводы устройств гиросtabilизации, приборные приводы различного типа компенсационных  $i$  устройств, программных механизмов и др. Приводами САС являются приводы широкого класса систем, предназначенных для слежения за объектами, перемещающимися в пространстве. Рулевые приводы могут входить как в контур управления, так и в контур стабилизации летательного аппарата. Приводы устройств гиросtabilизации используют для стабилизации положения объекта в случае возможных колебаний его основания. Как правило, механизмы, входящие в систему следящего привода, должны иметь высокую кинематическую и динамическую точность, а при передаче силовых нагрузок обладать необходимой прочностью, надежностью и долговечностью.

4. Механизмы ручной настройки являются составной частью измерительной, связной и радиовещательной аппаратуры, осуществляя с помощью оператора её настройку. Настройку производят путем перемеще-

ния с помощью передаточного механизма элемента настройки: ротора конденсатора переменной емкости, катушки вариометра, поршня в резонансной камере объемного резонатора и т. п.

5. Механизмы электромеханической настройки используют для дистанционной настройки радиоаппарата: они состоят из механизма настройки и следящей системы, датчик которой связан с ручкой настройки и находится на пульте управления, а приемник входит в конструкцию радиоаппарата, обеспечивая с помощью механизма дистанционной настройки перестройку исполнительного устройства. Это устройство может иметь плавную, фиксированную и смешанную настройку. Ввиду незначительной величины момента сил сопротивления перемещению элемента настройки передаточные механизмы этой группы можно отнести к кинематическим. К таким механизмам предъявляются высокие требования по точности перемещения элемента настройки.

6. Отсчетные механизмы обеспечивают отсчет величины переменного параметра с заданной точностью, создавая определенную кинематическую связь между перемещающимся элементом настройки и указателем. В отсчетных устройствах возможно также использование цифровых индикаторов.

7. Механизмы перемещения носителя информации в устройствах магнитной записи и воспроизведения осуществляют протягивание носителя записи. Механизмы для протягивания носителя записи имеют привод от электродвигателя и передачи зацеплением или гибкой связью.

Передаточные механизмы этих устройств являются силовыми, так как преодолевают момент сопротивления, возникающий от протягивания и ускоренной перемотки носителя информации. Для получения требуемого качества воспроизведения записи эти механизмы должны обеспечивать стабильность скорости перемещения носителя, что требует их исполнения с достаточно высокой точностью.

---

---

## 4. ВНЕШНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭС

---

---

### 4.1. Субъективные и объективные факторы, их влияние на работоспособность ЭС

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

*Субъективные факторы.* Эта категория факторов определяется действиями отдельных людей, оказывающих существенное влияние на надежность изделий на всех этапах, начиная от конструирования и изготовления и кончая их эксплуатацией. Однако степень влияния субъективных факторов на работоспособность радиодеталей и радиокомпонентов различна для различных этапов их изготовления. Ошибки, допущенные при конструировании, исправляются, как правило, усилиями всего коллектива. Ошибки, допущенные при изготовлении, выявляются во время многочисленных испытаний. Ошибка же одного эксплуатационщика может оказать решающее влияние на работоспособность радиодеталей и радиокомпонентов, на их готовность к выполнению основной задачи. Поэтому в основе значительной доли отказов радиодеталей и радиокомпонентов лежат неправильные действия обслуживающего персонала во время контроля функционирования, регулировки, ремонта и эксплуатации ЭС.

Основные субъективные факторы могут быть сведены к следующим:

а) небрежность в обращении с радиодетальями и радиокомпонентами при их производстве и эксплуатации;

б) отсутствие необходимых знаний и опыта, определяющих правильные действия в условиях эксплуатации (при выборе режимов работы, контроле функционирования, регулировке и ремонте).

Так, например, неточная установка режимов питания для транзисторов ведет к их быстрому выходу из строя. Коммутация необесточенных цепей ЭС, во время которой появляются опасные переходные процессы, вызывает преждевременное разрушение радиодеталей и радиокомпонентов или даже появление аварийных ситуаций. В такие моменты возникают перенапряжения и броски тока, создающие пробой, искрение, механические перегрузки и т. п. Незнание режима работы или особенностей, привносимых в работу схемы отдельными элементами, неумение использовать эти особенности при регулировке, настройке или контроле может привести к выходу из строя ЭС. Незнание признаков нормальной работы элементов, неправильная оценка отдельных ненормальных явлений в работе аппаратуры и в связи с этим несвоевременное устранение мелких неисправностей приводят к выходу из строя других, нормально функционирующих радиодеталей и радиокомпонентов.

К вынужденному выходу из строя радиодеталей и радиокомпонентов приводят также использование предохранителей, не соответствующих номиналу, небрежное обращение или неумение пользоваться органами регулировки, бессистемный поиск неисправностей ЭС и незнание возможных неисправностей радиодеталей и радиокомпонентов.

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

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

бы сократить выпуск дефектных радиодеталей и радиокомпонентов. Полное же исключение субъективных факторов, конечно, невозможно, они всегда имеются. Но их можно свести к минимуму. Для чего от специалистов, связанных с конструированием, изготовлением и эксплуатацией радиодеталей и радиокомпонентов, требуются высокая дисциплинированность, добросовестность и постоянное совершенствование своей квалификации.

*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.

#### **4.2. Влияние температуры на работоспособность радиодеталей и радиокомпонентов**

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

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

Изменение линейных размеров однородного тела  $\Delta l$  определяется известной зависимостью

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

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

Из уравнения видно, что на деформацию тела в одинаковой степени оказывает влияние как температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), так и разность температур. Если конструкция однородна и у всех ее частей температура изменилась на одну и ту же величину, то внутренних напряжений в ней не возникает – форма конструкции не искажается. Если же температура отдельных частей однородной конструкции не одинаковая, то она деформируется. В конструкции, состоящей из двух или более элементов, при изменении температуры геометрические размеры элементов изменяются не в одинаковой степени. Это приводит к деформации конструкции. Причем деформация конструкции тем больше, чем больше разница температур в отдельных ее частях и чем больше различаются ТКЛР ее элементов.

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

Деформация неоднородной конструкции, состоящей из нескольких связанных между собой элементов с различными ТКЛР, может значительно отличаться от подсчитанной по формуле 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  $\alpha$  находится в пределах  $(1...300) \cdot 10^{-6}$ . У металлов  $\alpha$  находится в пределах  $(1...40) \cdot 10^{-6}$ , у неорганических диэлектриков (керамика, стекло, кварц, слюда и др.)  $\alpha$  как правило, не превышает  $10 \cdot 10^{-6}$ . Наибольшее значение  $\alpha$ , 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 °С заметными становятся 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 вследст-

вие 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 °С вдвое сокращает срок их 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).

Воздействие высоких или низких температур может также привести к обратимому или необратимому изменению физико-химических свойств материала. При обратимых изменениях свойств материала геометрические размеры и значения параметров радиодеталей и радиокомпонентов восстанавливаются после того, как прекращается воздействие высоких или низких температур. При необратимом изменении физико-химических свойств материалов изменившиеся электрические и механические параметры радиодеталей и радиокомпонентов не восстанавливаются.

Повышение температуры сверх допустимого уровня вызывает ускоренное старение и разрушение элементов. Чрезмерное снижение температуры – катастрофическое ухудшение характеристик и отказы радиодеталей и радиокомпонентов. Изменение температуры ведет к изменению емкости, сопротивления изоляции и тангенса угла диэлектрических потерь конденсаторов, индуктивности высокочастотных катушек и дросселей, сопротивления резисторов. Например, емкость конденсаторов типа КСО (рис. 4.1) при отрицательных температурах уменьшается, а при положительных возрастает. Сопротивление изоляции (рис. 4.2) с увеличе-

нием температуры уменьшается. У электролитических конденсаторов наблюдается более сильная зависимость изменения емкости от температуры и особенно резкое ее уменьшение при предельно допустимых отрицательных температурах. Повышение рабочей температуры электролитических конденсаторов всего лишь на 10 ... 15 °С выше номинального значения снижает их срок службы в 8 ... 10 раз.

Изменения электрического сопротивления поверхностных и композиционных резисторов от температуры являются обратимыми, если температура в наиболее нагретом месте тела резистора не превышает предельно допустимую, в противном случае происходит необратимое изменение электрического сопротивления резистора. Для резисторов типов ВС, КВМ, КИМ, КЛМ, КЛИ и УЛМ предельная температура равна 125 °С, а для СЧ-1 равна 350 °С. Повреждения проволочных резисторов часто происходят из-за снижения сопротивления материала каркаса при его нагреве.

А большое различие ТКЛР провода и каркаса является причиной смещения витков и их замыкания.

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

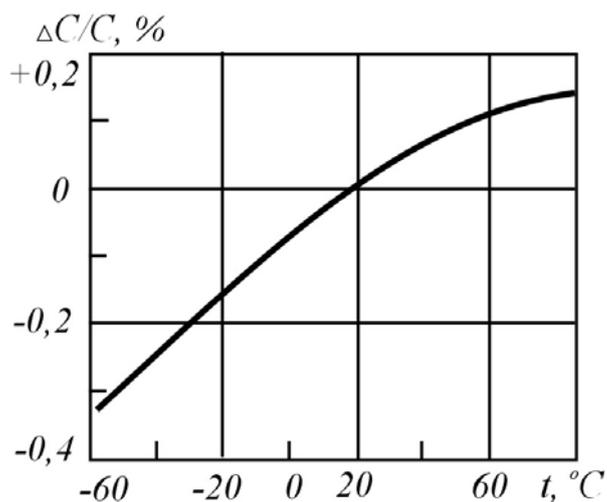


Рис. 4.1. Зависимость относительного изменения емкости конденсатора КСО-2-500-Г-3000 пФ  $\pm 5\%$  от температуры

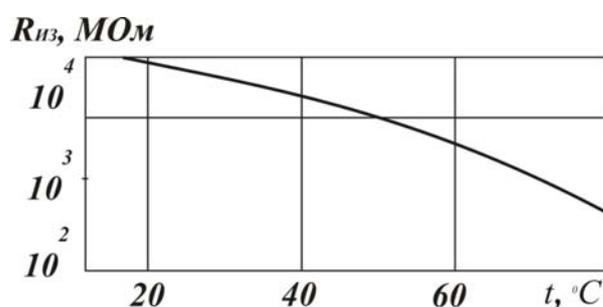


Рис. 4.2. Зависимость сопротивления изоляции  $R_{из}$  конденсатора КСО-2-500-Г-3000 пФ  $\pm 5\%$  от температуры

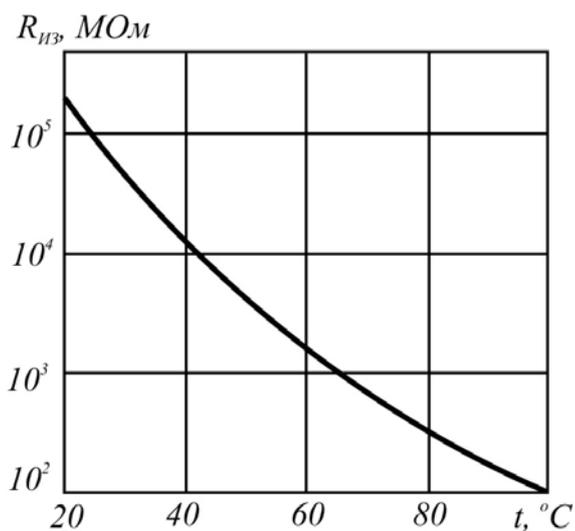


Рис. 4.3. Зависимость сопротивления изоляции  $R_{из}$  печатной платы на гетинаксе, изготовленной комбинированным методом, от температуры

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, проникшая в кожух, приводит к электрическому пробое 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 срок их службы.

Микромодули широкого применения могут работать в интервале температур от - 60 до + 70 °C. Длительное воздействие высоких темпера-

тур, 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 схем, являются сопротивление изоляции, тангенс угла диэлектрических потерь и диэлектрическая проницаемость. С увеличением температуры уменьшается сопротивление изоляции печатных схем (рис. 4.3), возрастают тангенс угла диэлектрических потерь и паразитная емкость. Это приводит к увеличению уровня потерь и ухудшению стабильности работы схем. Воздействие температур приводит к старению материалов, используемых для изготовления печатных схем, и, следовательно, к необратимому изменению их основных параметров.

Вышеизложенные соображения в значительной мере относятся и к интегральным схемам. Интегральные схемы высоконадежны, однако, как и другие радиодетали и радиокомпоненты, чувствительны к колебаниям температуры. Так, повышенные температуры вызывают формирование интерметаллических фаз в местах соединений, увеличение сопротивления контактов, миграцию ионов щелочных металлов и адсорбцию (поглощение) молекул воды, что может вызвать появление отказов. Более 90% отказов полупроводниковых интегральных схем в пластмассовых корпусах при высокотемпературных воздействиях происходит в результате обрыва и коротких замыканий внутренних проволочных соединений. Основная причина таких отказов определяется различием температурных коэффициентов линейного расширения металла и обволакивающего материала, что вызывает возникновение термомеханических напряжений и ускорение процессов отказов при термоударах и термоциклировании.

Температурные воздействия на интегральные схемы в керамических корпусах таких видов отказов практически не вызывают.

### 4.3. Влияние атмосферного давления на работоспособность ЭС

Радиодеталям и радиокомпонентам часто приходится работать при очень высоких или при очень низких атмосферных давлениях. Низкое атмосферное давление характерно для условий работы на большой высоте. С понижением атмосферного давления уменьшается электрическая прочность воздуха. Действительно, проводимость воздуха обусловлена движением носителей электрических зарядов – свободных электронов и положительно заряженных ионов, образованных его ионизацией. Носители зарядов под действием электрического поля движутся, создавая ток. При большой напряженности электрического поля образование носителей тока происходит лавинообразно. Возникновение лавинообразного процесса при пониженном давлении воздуха облегчается, так как увеличивается длина среднего пути свободного пробега электронов и возрастает вероятность ионизации молекул газа свободными электронами.

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

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

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

На рис. 4.4 приведена зависимость напряжения пробоя газового изоляционного промежутка между плоскими электродами от произведения длины промежутка  $d$  на величину атмосферного давления  $p$ . Из графиков видно, что при уменьшении давления электрическая прочность газовых изоляционных промежутков вначале снижается, а затем, достигнув мини-

мума при некотором давлении, снова растет. В связи с этим, оценивая характеристики радиодеталей и радиокомпонентов при пониженных давлениях, испытания проводят во всем диапазоне возможных изменений давления, а не в нескольких, произвольно выбранных точках.

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. Поэтому для предотвращения возникновения коронного электрического разряда предусматривают специальные меры.

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 негерметичных, 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.

После длительного пребывания уплотненных элементов под пониженным давлением и с последующим быстрым повышением давления до

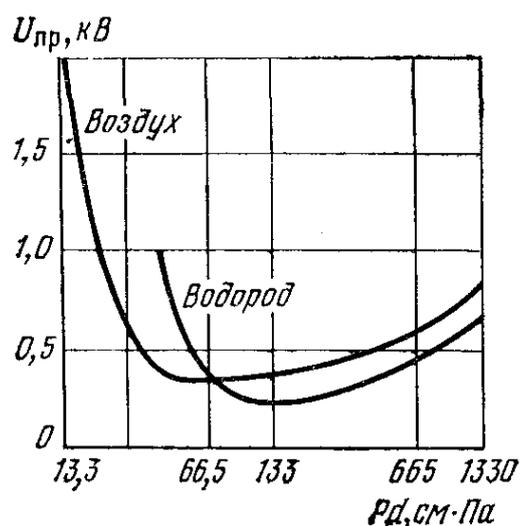


Рис. 4.4. Зависимость напряжения пробоя  $U_{пр}$  от произведения  $pd$

атмосферного могут возникнуть механические нагрузки, способные вызвать сдавливание корпуса. С такими явлениями встречаются, например, при транспортировании уплотненных элементов в негерметичных отсеках самолетов. При заходе на посадку самолет быстро теряет высоту, давление в отсеке возрастает и не рассчитанный на такие нагрузки корпус элемента может быть раздавлен.

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

#### **4.4. Влияние ядерной, космической и солнечной радиации на работоспособность радиодеталей и радиокомпонентов**

Радиацию разделяют на естественную и искусственную. К естественной радиации относят: космические излучения, корпускулярное и рентгеновское излучения Солнца, радиационные пояса Земли. Искусственная радиация возникает в результате ядерных реакций: при эксплуатации ЭС в зонах излучений на атомных электростанциях; на подводных лодках и кораблях с атомными двигателями; на самолетах, несущих на борту бомбы с атомными и термоядерными головками; в зонах излучений различных устройств, использующих атомную энергию в мирных целях и т. д.

Способность радиационных излучений проникать в толщу вещества и вызывать в нем ионизацию называют *ионизирующей радиацией*. Можно указать два элемента ядерной радиации, вызывающие повреждение радиодеталей и радиокомпонентов: поток нейтронов и гамма-излучение ( $\gamma$ -излучение). Воздействие радиации на вещество зависит от вида радиации, мощности потока (дозы) облучения, распределения энергии радиации по спектру, природы облучаемого вещества и окружающих климатических условий. Воздействие радиации на материалы и радиоэлементы может привести к обратимым и необратимым изменениям их электрических, физических и химических параметров. Обратимые изменения, вызываемые преимущественно  $\gamma$ -излучением, исчезают после прекращения действия радиации или при ее резком ослаблении. Необратимые изменения, связанные с нарушением структуры вещества, сохраняются и после

прекращения излучения. Заметное изменение свойств металлов происходит при плотности потока нейтронов более  $10^8$  нейтр./ $(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ .

При облучении таким потоком нейтронов на 10–20 % увеличивается сопротивление меди, молибдена и ряда других металлов. Кроме того, под воздействием радиации большинство металлов упрочняется. Так, при облучении большими дозами быстрых нейтронов твердость углеродистой стали увеличивается на 40 %, нержавеющей стали на 100 %, никеля на 140 %.

Воздействие нейтронного излучения вызывает структурные изменения, влияющие на такие параметры, как коэрцитивная сила, магнитная проницаемость, остаточное намагничивание, удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость. Радиационное излучение способствует также процессу коррозии металлов.

Наиболее радиационно стойкими являются неорганические материалы: стекло, кварц и особенно керамика. При облучении органических материалов в основном изменяются их механические свойства. Это ограничивает применение органических материалов в радиодеталях и радиокомпонентах. Особенно чувствительны к действию радиации пластмассы. Для них предельная плотность потока облучения составляет  $10^{14}$  нейтр./ $(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ . У большинства диэлектриков под воздействием радиации уменьшается механическая прочность, а в местах контактов органических материалов образуются металлоорганические соединения.

Воздействие ионизирующего излучения на резисторы может изменить свойства основного материала резистора, что приведет к изменению его сопротивления. Величина и знак изменения сопротивления резистора зависят от его номинального значения, величины приложенного напряжения, типа основного материала резистора и особенностей технологии изготовления. Чем больше сопротивление резистора, тем большие изменения вызывает облучение. Резисторы с сопротивлением порядка  $10^9$  Ом, работающие в условиях радиации, ненадежны.

Облучение резисторов потоком быстрых нейтронов вызывает как обратимые, так и необратимые изменения, что определяется величиной потока. Так, при плотности нейтронного потока, превышающей  $10^{11}$  нейтр./ $(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ , сопротивление резисторов изменяется необратимо. Гамма-излучение вызывает только обратимые изменения. Импульсное  $\gamma$ -

излучение (длительность импульса 0,1 мс) дозой 0,258 Кл/кг при мощности дозы  $2,58 \cdot 10^3$  А/кг в резисторах с номиналами от 1 до 10000 кОм вызывает обратимые уменьшения сопротивления на 1... 85 %. При малых дозах импульсных нейтронного и  $\gamma$ -излучений, воздействующих одновременно, изменения параметров резисторов обратимы. Характеристики резисторов полностью восстанавливаются через 1... 6 мс после облучения.

Ионизирующее излучение вызывает обратимые и необратимые изменения характеристик конденсаторов и, как правило, обратимые изменения величины утечки и тангенса угла диэлектрических потерь. Причем нейтронная радиация дает обратимые и необратимые изменения характеристик конденсаторов (в зависимости от дозы), а  $\gamma$ -излучение – обратимые изменения. Причина – изменение электрических характеристик диэлектрика (его диэлектрической постоянной и сопротивления изоляции). Кроме того, при воздействии радиации выделяются газы в электролитических конденсаторах, что может привести к их разрушению.

Особый интерес представляет рассмотрение влияния радиации на полупроводниковые приборы. Установлено, что  $\gamma$ -излучение вызывает нагрев полупроводниковых материалов, их ионизацию (появление свободных электронов), превращение  $\gamma$ -квантов в пары электрон – позитрон и возникновение под действием указанных эффектов электронно-дырочных пар. Степень проявления перечисленных эффектов зависит от величины энергии и интенсивности излучения, величины интегральной дозы и свойств поглотителя (облучаемого материала). Так, кремний и германий обнаруживают значительные изменения своих свойств при облучении потоков плотностью  $10^9$  нейтр./ $(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  или при  $\gamma$ -излучении дозой  $10^3 \dots 10^4$  Дж/кг.

Минимальная энергия  $\gamma$ -кванта, необходимая для образования пары электрон – позитрон, равна 1,02 МэВ. Возникновение многочисленных электронно-дырочных пар в обедненных слоях и вблизи их приводит к тому, что транзисторы и диоды ведут себя в схеме как дополнительный миниатюрный источник мощности. Электронно-дырочные пары, представляя собой избыточные носители, образуют первичный ионизационный ток  $I_{1и}$  в диффузионных переходах. При работе транзистора в нормальном режиме часть первичного ионизационного тока усиливается и появляется вторичный ионизационный ток  $I_{2и}$ . Отношение токов  $I_{1и}$  и  $I_{2и}$

примерно равно коэффициенту усиления транзистора  $\beta$ , когда схема работает в линейном режиме. Появление ионизационных токов увеличивает рабочие токи транзистора. Интенсивные ионизирующие излучения приводят к насыщению транзистора и к работе его в нелинейном режиме. Таким образом, появление переходных токов ведет к полному или частичному нарушению работы схемы за счет появления паразитных сигналов, к возникновению пробоя перехода из-за насыщения транзистора при соответствующем усилении, к появлению обратной связи, приводящей к паразитной генерации.

При облучении интегральных полупроводниковых схем возможно появление их перегрева, сопровождающееся разрушением из-за значительного увеличения переходных токов. Избыточные переходные токи вызывают переходные процессы в диодах. При значительных дозах облучений германий n-типа превращается в германий p-типа. В зависимости от мощности радиации возможно возникновение таких дефектов в кристаллической структуре решетки, при которых изменение усиления транзистора может быть обратимым или необратимым. Если поток не обладает достаточной мощностью, то нарушение работы транзистора состоит в значительном уменьшении усиления, которое через некоторое время после восстановления равновесия в структуре решетки вновь увеличивается. Иногда под действием нейтронов происходит необратимое уменьшение предельного тока коллектора, напряжения коллектор – эмиттер, напряжения насыщения коллектора и эквивалентных сопротивлений базы.

Повреждения от солнечной радиации для большинства радиодеталей и радиокомпонентов нехарактерны, так как они редко подвергаются непосредственному облучению солнечными лучами.

#### **4.5. Влияние влаги на работоспособность ЭС**

Воздействие климатических факторов вызывает изменение физико-химических свойств материалов, из которых изготовлены радиодетали и радиокомпоненты. Это может привести к изменению их параметров или к потере работоспособности. Степень изменения параметров тем значительнее, чем больше интенсивность и время воздействия различных климатических факторов. 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. Вследствие малых молекул воды и небольшой вязкости влага проникает через поры, трещины и зазоры в материал или внутрь изделия. 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.

Влага постоянно содержится в воздухе атмосферы. Даже при нормальной относительной влажности атмосферы (65 %) все тела, находящиеся в ней, покрыты тончайшей (0,001... 0,01 мкм) пленкой воды. Пленка воды 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. Например, при изменении относительной влажности с 50 до 90 % поверхностное сопротивление изоляции чистой керамической детали изменяется на 2 порядка (кривая 1 на рис. 4.5), а загрязненной – на 5 порядков (кривая 2).

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 уменьша-

ет механическую прочность металла, вызывает нарушение контактов или обрыв тонких проводов.

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. 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 возрастанию 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.

Величина электрического сопротивления, например композиционных резисторов типа КЛМ, выходит за пределы допустимого, если масса поглощенной воды больше 0,2% от массы резистора. При этом у нагруженного резистора под действием влаги происходит разрушение токопроводящего слоя. Оно вызвано перемещением проводящих частиц и разобщением их в набухшей во влажной среде лаковой пленке. Интенсивность разрушения токопроводящего слоя тем больше, чем больше влагопроницаемость пленки и чем меньше количество час-

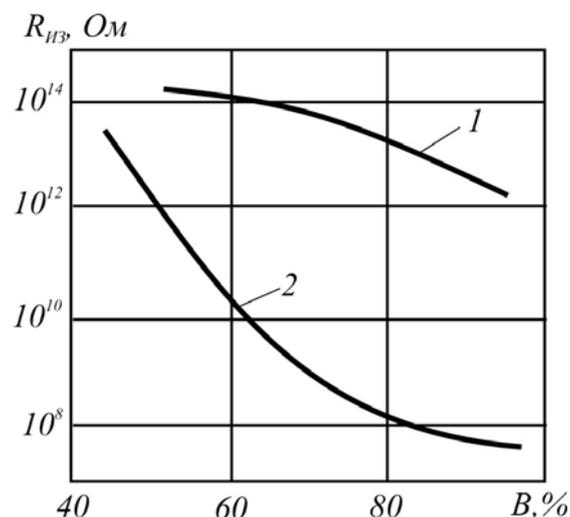


Рис. 4.5. Зависимость сопротивления изоляции  $R_{из}$  чистой (1) и загрязненной (2) керамических поверхностей деталей от относительной влажности воздуха  $B$

тиц токопроводящего слоя, приходящихся на единицу поверхности, прочность их сцепления между собой, с керамическим основанием и защитной лаковой пленкой. Влага, попавшая на токопроводящий слой нагруженного резистора, является причиной возникновения электрохимического процесса. В результате этого процесса выделяется кислород, который окисляет токопроводящий слой и разрушает его.

Для предотвращения проникновения влаги в область проводящего слоя непроволочные резисторы покрывают несколькими слоями (3 ... 4 слоя) 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 %. Оно происходит главным образом из-за шунтирующего действия сопротивления водяной пленки. В трансформаторах, дросселях, катушках индуктивности и катушках реле соли, растворенные в воде, обуславливают появление электрохимических процессов. При этом медь проводов, проникая в изоляцию, разрушает ее.

В печатных схемах 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 воз-

никновению необратимых явлений, вызывающих резкое уменьшение сопротивления изоляции. Покрытие печатных схем влагозащитными лаками, герметизация, заливка компаундами повышают их долговечность и стабильность работы.

Все виды конструкций интегральных схем, а также микромодулей и входящих в них элементов обеспечивают (благодаря надежной герметизации) устойчивость к воздействию повышенной влажности. У некоторых типов интегральных схем и микромодулей может наблюдаться незначительное изменение параметров, не превышающее установленные нормы.

Морской туман, иней, роса, являясь молекулярными разновидностями воды, оказывают на радиодетали и радиокомпоненты аналогичное воздействие.

#### **4.6. Влияние механических воздействий на работоспособность ЭС**

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

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

сящим от времени, так как деформации этого типа увеличиваются со временем. Механические повреждения, связанные с *нестабильностью конструкции*, вызываются скачкообразным увеличением деформации элемента конструкции при достижении нагрузки критического значения. Причиной механических повреждений и изменений электрических параметров радиодеталей и радиокомпонентов часто является *коррозия*. Коррозия уменьшает прочность конструкции, причем она протекает быстрее у материалов, которые находятся под механическим напряжением.

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

Механические воздействия, особенно ударные, могут вызвать различные поломки, которые приводят к отказу ЭС. У крупных радиодеталей и радиокомпонентов, например трансформаторов, дросселей низкой частоты и 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 акустические шумы могут вызвать взаимное перемещение деталей элементов ЭС, что изменяет их электрические параметры. Например, взаимное перемещение пластин конденсатора переменной емкости приводит к появлению паразитной модуляции (частотной, фазовой, амплитудной), что искажает передаваемую информацию.

Под воздействием сильных акустических шумов наблюдаются отказы некоторых электромеханических и электронных устройств, например источников питания, реле, переключателей. Типичным примером такого отказа является прерывистый контакт движка резистора переменного сопротивления с резистивным элементом.

Микроминиатюрные радиодетали и радиокомпоненты менее подвержены опасному воздействию акустических шумов. Объясняется это тем, что они имеют небольшую площадь поверхности, высокую плотность массы и шум не оказывает заметного влияния на них, так как вибрации, обусловленные акустическим шумом, имеют относительно малый уровень.

Радиодетали и радиокомпоненты, которые могут оказаться в условиях механических воздействий, должны иметь не только необходимую механическую прочность, но и обладать свойствами, не допускающими нежелательных изменений электрических параметров.

Основным способом защиты радиодеталей и радиокомпонентов ЭС от различного рода механических воздействий является применение амортизаторов и вибропоглощающих материалов (покрытий). Однако амортизаторы, эффективные при механических вибрациях, могут оказаться неэффективными для вибраций, обусловленных акустическим шумом, что объясняется различием в возбуждающих силах этих воздействий. Механические вибрации передаются через точки крепления, и любая изоляция вибраций, обеспечиваемая амортизирующими устройствами или конструктивными особенностями элемента, будет ослаблять высокочастотное возбуждение до того, 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 ЭС изготавливают из материалов, имеющих высокие демпфирующие свойства. Все малогабаритные радиодетали должны иметь жесткое крепление. Уменьшение числа объемных проводников достигается использованием многослойного печатного монтажа. Хорошие результаты по уменьшению интенсивности воздействия акустического шума дает заливка компаундами отдельных групп элементов.

---

---

## 5. МОДЕЛИ ЭС В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

---

---

### 5.1. Модели процессов и устройств в ЭС

*Разработка модели – ключевой этап инженерного проектирования.*

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.

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

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

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

В проектировании используют следующие виды моделей:

- графические и описательные (схемы, графики, которые иллюстрируют процессы, происходящие в устройствах, описания алгоритмов и т. д.);
- физические – они полностью повторяют объект исследования и могут быть масштабными, 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.

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 компьютера, обеспечивают решение уравне-

ний высших порядков и с большим числом переменных, но выдают решение только при конкретных исходных данных.

## 5.2. Моделирование процессов на основе аналогии

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

Электротепловую аналогию можно выразить следующими уравнениями:

1. Плотности тока и теплового потока в изотропной среде

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

где  $U$  – потенциал;  $\sigma$  – удельная электропроводность;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $t$  – температура.

2. Потоки  $J$  и  $P$  электрического и теплового полей

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

3. Объемная плотность тока  $V$  и производительность внутренних источников тепла

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

4. Поле потенциалов и температурное поле (уравнение Пуассона)

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

т. е. аналогами являются:

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

Соотношения между аналогами определяются масштабными коэффициентами подобия:

$$\frac{P}{I} = k_p; \frac{q_V}{j_V} = k_V; \frac{t}{U} = k_t; \frac{\lambda}{\sigma} = k_\lambda;$$

$$\frac{X}{x} = k_x; \frac{Y}{y} = k_y; \frac{Z}{z} = k_z.$$

Здесь  $X, Y, Z$  и  $x, y, z$  – координаты сходственных точек оригинала и модели соответственно.

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 (рис. 5.1). В первом случае (позиция а) узлы размещаются в центре элементарного параллелепипеда, а резисторы эквивалентной схемы замещения включаются между узлом и центрами граней. Во втором случае (позиции б, г) 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 прямоуголь-

ники для плоской задачи таким образом, чтобы граничные узлы электрической сетки совпали с границами моделируемой области. Шаги деления вдоль всех осей координат считаем постоянными. Таким образом, получаем сеточную модель с параметрами сетки:

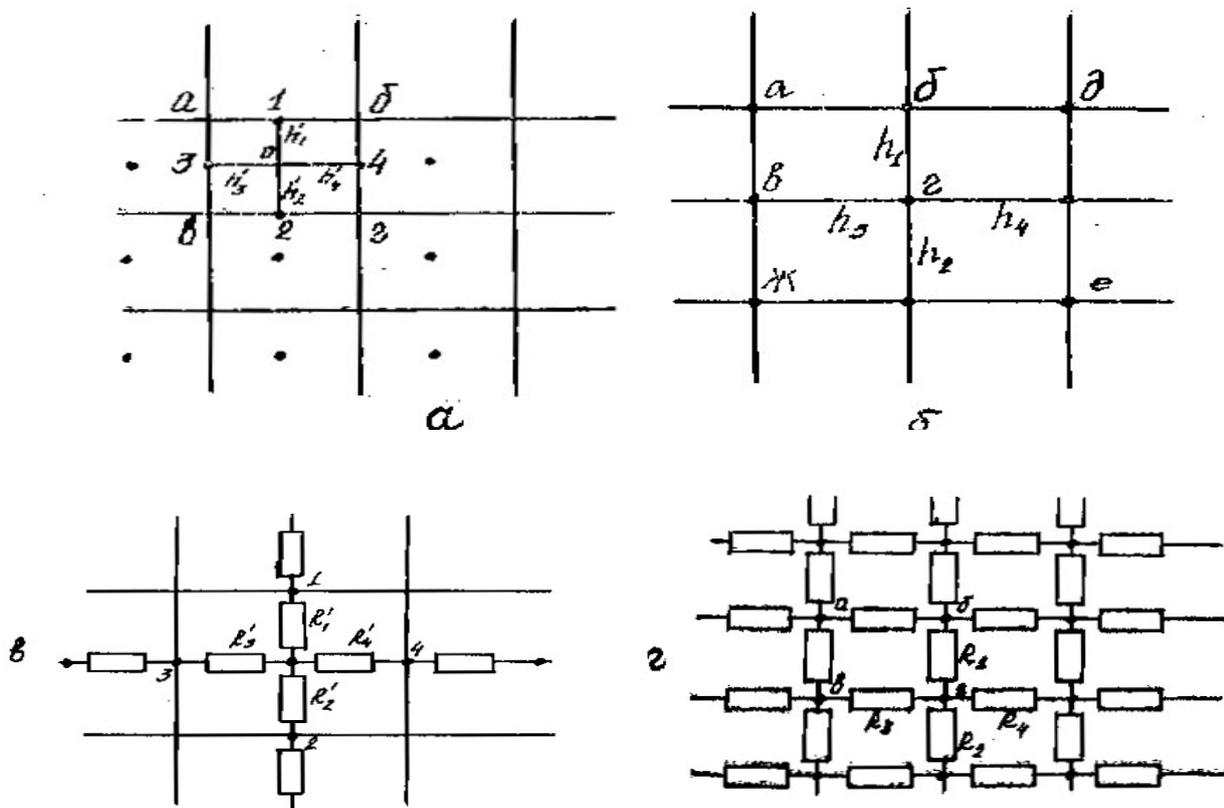


Рис. 5.1. Разбивка плоскости элементарными площадками:

а – сеткой с узлами внутри; б – сеткой с узлами в углах; в, г – сеткой электрических сопротивлений для случаев с узлами внутри и в углах

для объемной задачи

$$R_x = \frac{1}{\sigma_C} \frac{\Delta x}{\Delta y \cdot \Delta z}; \quad R_y = \frac{1}{\sigma_C} \frac{\Delta y}{\Delta x \cdot \Delta z}; \quad R_z = \frac{1}{\sigma_C} \frac{\Delta z}{\Delta x \cdot \Delta y};$$

для плоской задачи

$$R_x = \frac{1}{\sigma_C} \frac{\Delta x}{\Delta y}; \quad R_y = \frac{1}{\sigma_C} \frac{\Delta y}{\Delta x}.$$

Здесь  $\sigma_C = \sigma_\delta$  – удельная проводимость слоя. Если выбрать шаг по всем координатам один и тот же, то все внутренние сопротивления будут одинаковыми, т. е.  $R_x = R_y = R_z$ .

Рассмотрим температурное поле подложки гибридно-пленочной интегральной схемы, заключенной в корпусе (рис. 5.2).

Чтобы получить тепловую модель этой микросхемы, введем ряд допущений:

1. Активные элементы схемы рассматриваем как эквивалентные резисторы с той же рассеиваемой мощностью.

2. Тепловым сопротивлением между пленкой резистора и подложкой пренебрегаем из-за наличия хорошего контакта.

3. Коэффициент теплопроводности в исследуемом диапазоне температур считаем постоянным.

4. При расчете параметров электрической сетки тепловые сопротивления пленок не учитываем, считая, что пленки проводников резисторов оказывают незначительное влияние на распределение температуры по подложке из-за большого сопротивления тепловому потоку.

5. Поверхность корпуса считаем изотермической поверхностью.

6. Теплоотводом через выводы микросхемы пренебрегаем. При построении тепловой модели микросхемы необходимо считать конструкцию сложной структурой следующего вида:

- слой кобальта толщиной 0,15мм (нижняя часть корпуса);
- слой клея-мастики ЛН толщиной 0,1...0,2 мм (с помощью этого клея подложка крепится к корпусу);
- слой диэлектрика (обычно подложка выполнена из ситалла СТ-50-1);
- воздушный промежуток;
- слой кобальта (крышка корпуса).

Расчеты говорят о том, что тепловое сопротивление воздушного промежутка более чем на два порядка больше теплового сопротивления подложки и клеевой прослойки, поэтому почти весь тепловой поток с верхней поверхности подложки с элементами будет направлен вниз к нижней части корпуса. Далее он рассеивается в основном за счет конвекции. Если микросхема установлена на плате, то в конвективном теплообмене участвует лишь верхняя часть корпуса.

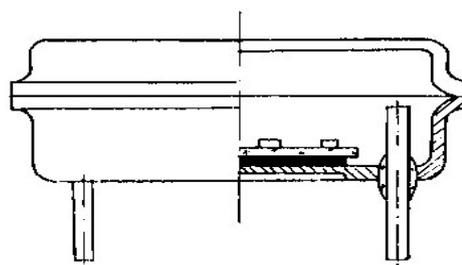


Рис. 5.2. Конструкция микросхемы

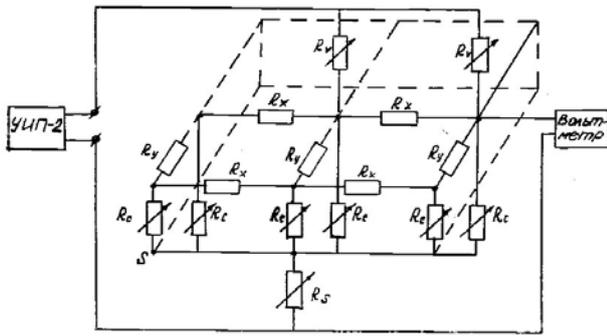


Рис. 5.3. Тепловая модель микросхемы

Тепловая модель микросхемы – это плоская электрическая схема (рис. 5.3). Между узлами сетки и точкой S, которая соответствует изотермической поверхности корпуса, включены сопротивления  $R_C$ , моделирующие тепловые сопротивления подложки и клеевой прослойки

по всей толщине. Между точкой S и общей точкой модели включено сопротивление  $R_S$ , которое моделирует конвективный теплообмен (корпус микросхемы – окружающая среда). В узлах электрической сетки включено сопротивление  $R_V$ , через которое вводятся токи, моделирующие внутренние источники тепла. Это сопротивление должно быть значительно больше сопротивлений  $R_X$  и  $R_Y$ , чтобы последние не оказали влияния на величину вводимых токов.

Значит,  $i_V = U_V / R_V$ , где  $U_V$  – напряжение питания модели,  $i_V$  – ток, вводимый в соответствующий узел электрической сетки. Величина тока  $i_V$ , вводимого в узел сетки, определяется мощностью тепловыделяющего элемента в этом узле  $P_V$  и масштабным коэффициентом подобия.

Из сказанного можно сделать вывод, что потенциалы узлов сетки, измеренные относительно общей точки модели, дают возможность определить температуру перегрева поверхности подложки относительно окружающей среды, а потенциал точки S, тоже измеренный относительно общей точки модели, дает возможность определить температуру перегрева корпуса микросхемы относительно температуры окружающей среды.

Параметры сетки рассчитываются по формулам

$$R_x = \frac{k_\lambda \Delta x}{\lambda \delta \Delta x}; R_y = \frac{k_\lambda \Delta y}{\lambda \delta \Delta y}.$$

Так как  $\Delta x = \Delta y$ ;  $R_x = R_y = R$ , сопротивление сетки между узлами, лежащими на границах прямоугольной подложки, равно  $2R$ .

Сопротивление стоков на корпус

$$R_C = R'_C + R''_C,$$

где

$$R'_C = \frac{k_\lambda \delta_1}{\lambda_1 \Delta x \Delta y}; \quad R''_C = \frac{k_\lambda \delta_2}{\lambda_2 \Delta x \Delta y};$$

$k_\lambda = \lambda / \delta$  – масштабный коэффициент подобия;  $\delta_1$  – толщина подложки;  $\delta_2$  – толщина слоя клея-мастики;  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности материала подложки;  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности клея-мастики.

Сопротивления, моделирующие теплообмен корпуса микросхемы с окружающей средой,  $R_S = \frac{k_\lambda}{\alpha S}$ , где  $S$  – поверхность корпуса, участвующая в конвективном теплообмене с окружающей средой;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией между корпусом и средой ( $\alpha = 25 \dots 30$  Вт/м<sup>2</sup>\*град).

Имеется формула пересчета значений потенциалов узловых точек в значение температуры:

$$t = \frac{R_{V'} P}{k_\lambda U_v} U,$$

где  $P$  – общая мощность всех тепловыделяющих элементов;  $R_{V'}$  – сопротивление, равное параллельному соединению всех сопротивлений.

Данные для расчета следующие: размеры корпуса микросхемы, размеры подложки, толщина эпоксидного клея между полупроводниковым прибором и подложкой, толщина клея между подложкой и корпусом, шаг сетки, материалы, теплофизические параметры материалов, общая мощность, которую выделяют все тепловыделяющие элементы.

### 5.3. Интерполяционные математические модели

Всякое исследование того или иного процесса имеет своей целью изучить механизм явления и найти оптимальные условия его протекания.

Характерным для всех задач этого типа является то, что оптимизации подлежат сложные системы или части системы, у которых параметры оптимизации являются функциями большого числа переменных.

В настоящее время имеется два пути решения указанных задач. Согласно первому пути для оптимизации системы или процесса необходимо предварительное ее исследование, создание теории процесса или явления. Такой путь требует много времени и средств на изучение самого процесса. Кроме того, современные системы настолько сложны и работают в столь сложных условиях, что детальное их изучение в доступные сроки практически невозможно.

Второй путь предусматривает экспериментальный подход к оптимизированной системе, т. е. использование различных методов планирования эксперимента. Такие приемы планирования и проведения эксперимента позволяют добиться следующих преимуществ при оптимизации:

- уменьшить количество экспериментальной работы;
- не только оптимизировать систему, но и получить ее математическое описание или математическую модель, адекватную (соответствующую) опытным данным;
- вся схема исследования оказывается формализованной, информация, которая получается в процессе исследования, может гибко менять стратегию поиска оптимальных условий.

С точки зрения математики задача ставится следующим образом: проектирование объекта заключается в выборе модели исследования, обосновании выбранных параметров оптимизации и независимых переменных. Математическая модель объекта исследования может быть получена в виде уравнения связи выходного параметра  $Y$  объекта и входных независимых переменных  $x_1; x_2; \dots; x_k$ . Уравнение связи является математическим описанием некоторой поверхности отклика в пространстве  $k$  сходных факторов и может быть задано функцией отклика

$$Y = f(x_1; x_2; \dots; x_k), \quad (5.1)$$

где  $Y$  – параметр, который подлежит оптимизации;  $x_1; x_2; \dots; x_k$  – независимые переменные, далее называемые факторами.

Всевозможные наборы значений независимых переменных назовем  $k$ -мерным факторным пространством. Задача оптимизации состоит в том, чтобы найти такое значение вектора  $x = (x_1; x_2; \dots; x_k)$ , которое оптимизирует в требуемом смысле функцию (5.1). Функцию отклика аппроксимируют полиномом вида

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (5.2)$$

где  $\beta_0; \beta_i; \beta_{ij}; \beta_{ii}$  – теоретические коэффициенты регрессии. Как правило, на практике ограничиваются конечным числом членов разложения, аппроксимируя неизвестную функцию отклика полиномом некоторой степени. Задача получения математической модели объекта или явления сводится к определению коэффициентов уравнения (5.2) по опытным данным.

Реальные объекты исследования подвержены действию возмущающих факторов различной природы, поэтому величина  $Y$  изменяется случайным образом, и уравнение (5.2) не дает возможности установить точную связь между входом и выходом объекта, а является лишь условным математическим ожиданием выходной переменной, т. е. уравнением связи является уравнение регрессии. Поэтому коэффициенты полинома, определенные в результате эксперимента, являются статистическими оценками соответствующих истинных значений. Значит, в уравнении регрессии

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (5.3)$$

где коэффициенты  $b_0; b_i; b_{ij}; b_{ii}$  – являются оценками истинных значений коэффициентов  $\beta_0; \beta_i; \beta_{ij}; \beta_{ii}$  и т. д., а  $Y$  – расчетное значение параметра оптимизации.

При дальнейшем изложении на примере определения температурного поля конструкции ЭС, представленной в виде модели, показана возможность использования экспериментально-статистического метода (планирование эксперимента) для решения. Сначала будет рассмотрен ме-

тод построения линейной модели, а затем модели второго порядка с использованием ротатабельного планирования.

*Тепловой режим как многофакторный процесс.* Важнейший параметр ЭС – надежность – в значительной мере зависит от температурных режимов, в которых работают входящие в нее элементы. Совокупность температур всех элементов, из которых собран аппарат, т. е. температурное поле, характеризует тепловой режим ЭС. Тепловой режим ЭС относится к сложным процессам, которые зависят от множества следующих факторов:  $P$  – мощность, выделяемая в устройстве;  $\Phi$  – размеры устройства;  $\lambda$  – коэффициенты теплопроводностей входящих материалов;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией;  $\epsilon$  – степени черноты материалов;  $C_0$  – удельная теплоемкость входящих материалов;  $H$  – давление;  $\beta$  – коэффициенты линейного расширения материалов;  $t_0$  – температура окружающей среды и т. д.

Некоторые из этих факторов не являются однозначными и, в свою очередь, зависят от других, усложняя процесс расчета.

Учитывая, что число факторов, влияющих на тепловой процесс ЭС, велико, получение в этом случае математической модели и нахождение оптимального варианта конструкции с требуемыми характеристиками – задача очень сложная. Решение возможно путем проведения активного эксперимента с применением статистических методов.

Между точками, значение температур в которых определяется экспериментально, могут быть отклонения, поэтому желательно просмотреть температурное поле объекта исследования с помощью изотерм. Для этого и используется теория планирования эксперимента, по которой изотермические поверхности строятся по уравнению регрессии, а некоторые данные для получения этого уравнения являются результатами эксперимента. Подход к организации эксперимента и его планирование состоят из предварительного изучения объекта исследования и построения математической модели и ее интерпретации.

*Предварительное изучение объекта исследования.* Предварительное изучение объекта исследования заключается в том, чтобы точно сформулировать цель работы, собрать априорную информацию об объекте исследо-

вания и спроектировать данный объект. Сбор априорной информации – это изучение литературы по интересующему вопросу, анализ результатов ранее проведенных работ. Проектирование объекта заключается в выборе модели исследования, обосновании выбранных параметров оптимизации и независимых переменных.

Как уже было показано, функцию отклика аппроксимируют полиномом

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \dots ,$$

где  $\beta_0; \beta_i; \beta_{ij}; \beta_{ii}$  - теоретические коэффициенты.

При эксперименте уравнение примет вид

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots ,$$

где  $b_0; b_i; b_{ij}; b_{ii}$  – оценки теоретических коэффициентов;  $Y$  – расчетное значение параметра оптимизации (температуры).

Пример. Используемый для эксперимента объект исследования представляет собой герметичный корпус с размерами 80x85x65 мм<sup>3</sup>, в котором горизонтально расположены кассеты. Каждая из кассет – монтажная плата с радиоэлементами, выполненная из стеклотекстолита  $b = 1,5$  мм с печатным монтажом. Рассеиваемая мощность в модели  $P = 2$  Вт. Внутреннее пространство модели залито компаундом. Измерение температуры проводилось хромель-копелевыми термопарами  $d = 0,3$  мм с помощью потенциометра постоянного тока. Термопары крепились на платах с некоторым постоянным шагом. Измерения проводились в камере спокойного воздуха большого объема при температуре  $20 \pm 0,5$  °С.

На первом этапе оценивается влияние факторов на температурный режим объекта исследования и выделяются наиболее значимые из них на фоне остальных, отнесенных к шумовому полю. Одновременно изучалось влияние 11 факторов, перечисленных в табл. 5.1, которые были ранжированы с учетом степени их влияния. Результаты ранжирования по литературным данным обрабатываются следующим образом.

Таблица 5.1. Матрица рангов

Факторы											
Геометрические параметры			Физические свойства							Параметры среды	
М	Геометрические размеры объекта, мм	Расстояние между платами, мм	Координаты источника тепла, мм	Степень черноты внутренней поверхности	Степень черноты внешней поверхности	Мощность, выделяемая в блоке, Вт	Теплопроводность платы, λ	Теплопроводность внутренней среды	Теплопроводность стенок	Температура окружающей среды, °С	Давление в блоке, Н
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$
1	4	11	10	2	2,5	11	4	5	6	7	3,5
2	4,5	9	11	3	3	11	4	6	5	6,5	3
3	4	10	10	2,5	3	9	4	6	5,	8	4
$\sum_{i=1}^m a_{ij}$	12,5	30	31	7,5	8,5	31	12	17	16	21,5	10,5
$\Delta_i$	-5,5	12	13	-10,5	-9,5	13	-6	-1	-1,	3,5	-7,5
$\Delta_i^2$	30,25	144	169	110,3	90,25	169	36	+1	2,	12,25	56,25
											820,5

Сначала определяют сумму рангов по факторам  $\sum_{j=1}^m a_{ij}$ , а затем разность между суммой рангов каждого фактора и средней суммой рангов:

$$\Delta_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} - \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m a_{ij}}{k} = \sum_{j=1}^m a_{ij} - T, \quad (5.4)$$

где  $a$  – ранг каждого  $i$ -го фактора;  $m$  – число литературных данных (или исследователей);  $k$  – число факторов.

Полученные данные позволяют построить среднюю априорную диаграмму рангов, но при этом предварительно необходимо оценить степень согласованности литературных данных с помощью коэффициента конкордации:

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12}m^2(k^3 - k) - m \sum T_i}, \quad (5.5)$$

где  $S$  – сумма квадратов отклонений  $\sum_{j=1}^m \Delta t^2$ ;

$$T_i = \frac{1}{12} \sum_{t_i} (t_j^3 - t_j)$$

– число одинаковых рангов в  $j$ -м ранжировании.

Проведем расчет коэффициента  $W$ :

$$W = \frac{820,55}{\frac{1}{12} \cdot 9(1331 - 11) - \frac{1}{12} \cdot 3 \cdot 72} = 0,844.$$

Поскольку величина коэффициента конкордации существенно отличается от нуля, можно говорить о согласованности мнений литературных источников, однако факторы оценены по-разному, т. е. заметно отличаются от единицы. Значимость коэффициента конкордации проверяется по  $\chi^2$ -критерию:

$$\chi^2 = \frac{S}{\frac{1}{12}mk \left( k + 1 - \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^m T_j \right)}. \quad (5.6)$$

Подставляя значения из таблицы 5.1, получим (таблица 5.2)

$$\chi^2 = \frac{820,55}{\frac{1}{12} \cdot 3 \cdot 11 \cdot 12 - \frac{1}{10} \cdot 72} = 32,8.$$

Таблица 5.2. Значения  $\chi^2$  – критерия для уровня значимости 0,05

Число степеней свободы	1	2	3	4	5	6	7
$\chi^2$	3,84	5,99	7,815	9,488	11,07	14,067	15,50
Число степеней свободы	11	12	13	14	15	17	18
$\chi^2$	19,67	21,02	22,36	23,68	24,99	27,58	28,86
Число степеней свободы	21	22	23	24	25	27	28
$\chi^2$	32,67	33,92	35,17	36,415	37,652	40,113	41,337

Для  $\chi^2$  – критерия находим, что для 5 % уровня значимости при числе степеней свободы  $f=k-1 = 10$  величина  $\chi^2_{\text{Табл}} = 18,307$ .

В связи с тем, что табличное значение  $\chi^2$  критерия меньше расчетного, можно с 95 % достоверностью утверждать, что мнения авторов литературных источников или исследователей в этом вопросе согласуются. Это позволяет построить среднюю априорную диаграмму рангов для рассматриваемых факторов. По результатам диаграммы отбираем для дальнейшего исследования следующие факторы: геометрические размеры устройства, выделяемая мощность, температура окружающей среды.

Планирование эксперимента. При ведении эксперимента используется факторный эксперимент  $2^5$  с генерирующим соотношением  $x_5 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$ , определяющий контраст вида  $l = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5$ . Значения температуры являются средними из двух параллельных опытов. График пересчета термо-ЭДС приведен на рис. 5.5, матрица планирования представлена в табл. 5.3. Матрица планирования имеет стандартную форму, потому что в ней использованы кодированные факторы.

Кодирование факторов подчиняется соотношению

$$x_j = \frac{C_j - C_{0j}}{\varepsilon}, \quad (5.7)$$

где  $x_j$  – безразмерная величина (кодированное значение фактора);  $C_j$  – натуральное значение фактора;  $C_{0j}$  – натуральное значение  $j$ -го фактора на нулевом уровне варьирования;  $\varepsilon$  – натуральное значение интервала варьирования.

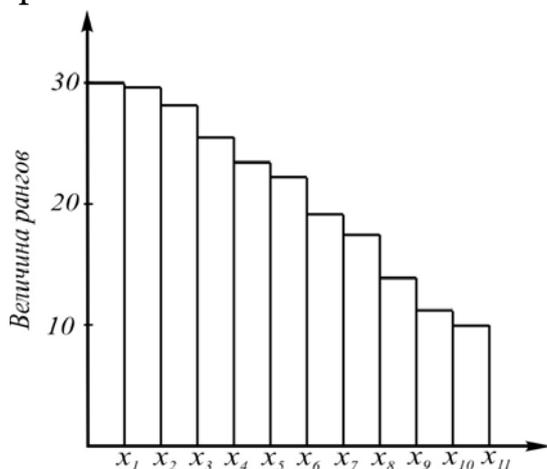


Рис. 5.4. Априорная диаграмма рангов

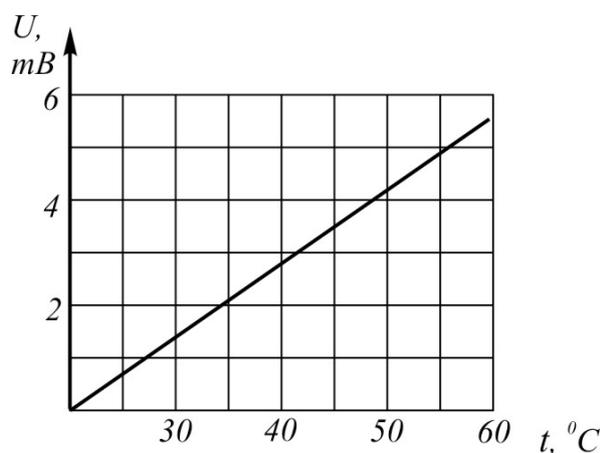


Рис. 5.5. График зависимости термо-ЭДС от температуры

Таблица 5.3. Матрица планирования

Уровни варьирования факторов	Координаты источников тепла, мм	Мощность Р	Температура среды $t_{cp}$ , °С	Температура в блоке		
	по оси x	по оси y	по оси z			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	
+2	48	64	46	2,5	40	
+1	38	49	36	2,0	30	
0	28	34	26	1,5	20	
-1	18	19	16	1,0	10	
-2	8	4	6	0,5	0	
Интервал $\varepsilon$						
1	+	+	+	-	+	42,3
2	-	+	-	-	-	42,7
3	+	-	+	+	-	44,6
4	-	-	+	+	+	44,8
5	+	+	-	+	-	40,5
6	-	+	-	+	+	41,3
7	+	-	-	+	+	43,8
8	-	-	-	+	-	44,2
9	+	+	+	-	-	30,7
10	-	+	+	-	+	30,8
11	+	-	+	-	+	31,5
12	-	-	+	-	-	31,9
13	+	+	-	-	+	29,6
14	-	+	-	-	-	29,9
15	+	-	-	-	+	31,4
16	-	-	-	-	-	31,8

По матрице планирования рассчитываются коэффициенты регрессии по формулам

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N y_u}{N}; b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot y_u}{N}; b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot y_u}{N}. \quad (5.8)$$

В результате расчетов получены следующие значения коэффициентов:

$$\begin{array}{lll}
b_0 = 26,7; & b_4 = 5,2; & b_{23} = 0,062; \\
b_1 = -0,18; & b_{12} = 0,137; & b_{24} = 0,006; \\
b_2 = -0,37; & b_{13} = 0,137; & b_{34} = 0,643. \\
b_3 = 1,47; & b_{14} = -0,112. & 
\end{array}$$

Для построения математической модели проводится статистический анализ уравнения регрессии по формулам

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{u=1}^n (y_{iu} - \bar{y}_u)^2}{N(n-1)}; \quad S_{\{y\}}^2 = 0,51; \quad S_{\{b_i\}}^2 = \frac{S_{\{y\}}^2}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2};$$

$$S_{\{b_i\}}^2 = 0,0318; \quad \Delta b_i = \pm 0,0668. \quad (5.9)$$

Проверка значимости оценок коэффициентов производится с помощью критерия Стьюдента. Для этого вычисляется оценка дисперсии коэффициентов регрессии :

$$S_b^2 = (1/n) S_y^2. \quad (5.10)$$

Коэффициент  $b_j$  значим, если  $|b_j| < t_\alpha$ , где  $t_\alpha$  – табличное значение,  $\alpha$  – уровень значимости.

Из определения значимости можно сказать, что все коэффициенты, кроме  $b_{23}$ ;  $b_{24}$ , значимы. Члены уравнения с незначимыми коэффициентами отбрасываются. Статистическая незначимость коэффициента может быть обусловлена рядом следующих причин: интервал варьирования выбран малым, данная переменная не имеет связи с выходной переменной, велика ошибка эксперимента из-за присутствия неуправляемых переменных.

Проверка адекватности модели заключается в оценке соответствия экспериментальных данных выходной переменной (температуры) значениям, вычисленным по полученному уравнению регрессии. Адекватность модели проверяется с помощью критерия Фишера, т. е. производится проверка гипотезы о равенстве двух дисперсий. Если

$$F = \frac{S_{AD}^2}{S_y^2} \quad (5.11)$$

меньше  $F_{табл}$ , то можно утверждать, что уравнение регрессии адекватно отражает результаты эксперимента .

#### **5.4. Разработка модели – ключевой этап инженерного проектирования**

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.

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

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

Система, которая удовлетворяет всей совокупности условий и ограничений на параметры и структуру, называется допустимой. Допустимая

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

В проектировании используют следующие виды моделей:

- графические и описательные (схемы, графики, которые иллюстрируют процессы, происходящие в устройствах, описания алгоритмов и т. д.);
- физические – они полностью повторяют объект исследования и могут быть масштабными, 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.

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 компьютера, обеспечивают решение уравнений высших порядков и с большим числом переменных, но выдают решение только при конкретных исходных данных.

## 5.5. Основы моделирования конструкций и технологических процессов производства ЭС

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

Роль моделей в проектировании ЭС. Рассмотрим процесс автоматизированного проектирования ЭС с точки зрения использования в нем различного рода моделей. На рис. 5.6 показано, что исходные данные на проектирование ЭС содержатся в техническом задании. И от него осуществляется переход непосредственно к проекту ЭС. Вначале, как уже упоминалось выше, проект предстает как мысленный образ будущей схемы и конструкции ЭС, который фиксируется в виде эскизных схем и чертежей. Впоследствии этот образ многократно уточняется по мере разработки схем и чертежей на стадиях технического и рабочего проектирования. При этом несколько раз циклически реализуется замкнутая цепь переходов от одной модели к другой, как показано на рис. 5.6.

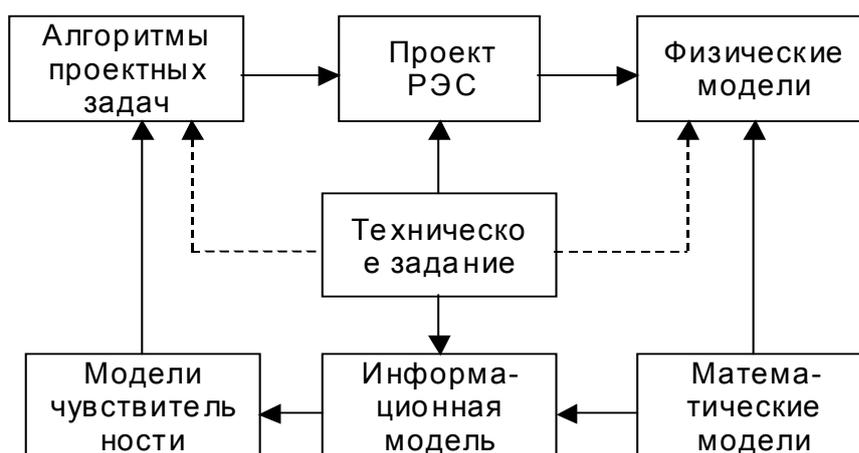


Рис. 5.6. Роль моделей в автоматизированном процессе разработки ЭС

Переход в очередном цикле от проекта ЭС к физическим моделям процессов, протекающих в схемах и конструкциях, заключается в форма-

лизации 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. 5.6).

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

При построении физических моделей электрических процессов, протекающих в схемах ЭС, с позиций системного подхода решаются вопросы о необходимости учета тех или иных паразитных явлений влияния конструкции, о видах применяемых моделей РЭ, о характере учета воздействия внешних факторов и пр.

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 получают 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 ЭС можно изготовить в виде макетов. Однако автоматизация проектирования с помощью компьютера сделала макетирование практически ненужным, поскольку математическое моделирование позволяет более полно и с меньшей трудоемкостью провести системный анализ комплекса физических процессов ЭС.

Переход от физических моделей к математическим (рис. 5.6) осуществляется путем математического описания физических элементов и их соединений с помощью известных законов Ома, Кирхгофа, Фурье, Гука, сохранения энергии, импульса и пр. Поэтому данный переход от заданной физической модели может выполняться автоматически по типовым алгоритмам. Формы математических моделей подробно будут рассмотрены в следующих параграфах настоящей главы.

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. 5.6 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.

## **5.6. Математическое моделирование физических процессов ЭС**

Рассмотренные принципы классификации расчетных математических моделей ЭС позволили выделить аналитический, структурный, топологический и морфологический виды моделей. Указаны также возможные формы представления расчетных моделей каждого вида.

Принципы исследования параметрической чувствительности ЭС предъявляют различные требования к исходным расчетным моделям: простота связи выходной характеристики с параметрами – в одних случаях, возможность получения определенных промежуточных переменных – в других, необходимость обособленного выделения рассматриваемых параметров – в третьих, наличие свойства взаимности у модели – в четвертых и пр. С учетом этих требований возникает необходимость не только унифицировать формализованное представление известных форм математических моделей разнородных по физической природе процессов, но и применить новые виды и формы моделей этих процессов с использованием теории графов.

Дальнейшая структура настоящего параграфа отражает классификацию расчетных моделей ЭС по видам унифицированного представления, не зависящего от типа моделируемого физического процесса.

Понятие аналитической модели можно трактовать как буквенное представление операторного описания любого физического процесса ЭС средствами математического анализа и алгебры. Формы буквенных выражений могут быть разнообразны, однако целесообразно выделить типовые формы, охватывающие большинство практических случаев, с тем, чтобы для них можно было подобрать наиболее эффективные методы и каталогизировать на компьютере алгоритмы исследования параметрической чувствительности выходных характеристик физических процессов и решить проектные задачи. Это позволит при конструировании ЭС любому инженеру средней квалификации привести модель к типовой форме и воспользоваться готовыми инструктивными материалами и программами для компьютера с целью проведения соответствующих исследований и расчетов. В отдельных нетиповых случаях представления математических моделей аппаратуры всегда можно остановиться на универсальных, правда, не всегда по трудоемкости эффективных методах вариаций и планированного эксперимента.

Рассмотрим типовые, часто встречающиеся на практике формы аналитических расчетных моделей ЭС. Наиболее общая форма аналитической расчетной модели – нелинейная вектор-функция, которая может быть явной функциональной зависимостью

$$y = f(x, q, \xi) \quad (5.12)$$

или неявной функциональной зависимостью

$$F(x, y, q, \xi) = 0. \quad (5.13)$$

Следовательно, примером аналитической модели может служить любая формула, связывающая выходные характеристики ЭС с его внутренними параметрами.

Неявная функциональная зависимость (5.12) в качестве аналитической расчетной модели также часто используется при конструировании

ЭС. Например, подобные модели часто составляются на основе уравнений тепловых балансов для анализа тепловых режимов ЭС.

Как видно из приведенных выше примеров, аналитические расчетные модели в форме (5.12) или (5.13) связаны, как правило, с макро моделированием, т. е. с общим упрощенным представлением протекающих в ЭС процессов, причем нередко путем математической обработки экспериментальных данных. Такой подход дает хотя и менее точные результаты, чем более детальное моделирование на компьютере физических процессов в конструкциях, однако позволяет ускорить исследования, используя богатый предыдущий опыт разработки ЭС.

В тех случаях, когда удастся более детально аналитически описать линейный режим исследуемого физического процесса в конструкции, форма (5.13) аналитической расчетной модели часто может быть представлена в матричной записи:

$$Cy = x, \quad (5.14)$$

где  $C=[C_{ij}]$  – параметрическая матрица ЭС или технологического процесса.

Во многих расчетах матричная форма (5.14) применяется для аналитического моделирования, прежде всего, электрических, механических и тепловых процессов. Возможность такого применения единого вида описания разнородных физических процессов служит также основой для развития унифицированных методов моделирования этих процессов на основе аналогий и системного подхода в исследовании параметрической чувствительности ЭС и технологических процессов.

Форму (5.14) аналитической расчетной модели удобно применять в операторной и частотной областях исследования, а также при изучении процессов в статических (стационарных) режимах. Во временной области переходят к системе дифференциально-алгебраических уравнении первого порядка, составленных, например, по методу переменных состояний в виде

$$y_j = \Phi_j(x, y, q, t), j = 1, 2, \dots, N,$$

причем первая производная во времени  $y_j$ , для некоторых  $j$  может быть равна нулю. Можно составить общее дифференциальное уравнение  $N$ -го порядка относительно одной выделенной выходной характеристики:

$$D(p)y_j(t) = \sum_{i=1}^m G_{ij}(p)y_j(t),$$

где

$$D(p) = \sum_{i=1}^m a_r p',$$

- собственный оператор рассматриваемого физического процесса;

$$G_{ij}(p) = \sum_{i=0}^{m_i} b_{ijl} p',$$

- возмущающий оператор  $i$ -го воздействия при расчете  $j$ -й характеристики, причем  $m_i$  - порядок оператора;  $pt = d/dt$  - символ дифференцирования;  $a_r, b_{ijl}$  - постоянные и переменные коэффициенты, зависящие от параметров  $q$ .

Аналитические модели играют большую роль при сочетании автоматизированных и неавтоматизированных методов конструирования, включая полунатурные испытания. Однако такие модели не отражают общей структуры построения конструкции, поэтому их часто строят совместно с другими видами математических моделей.

## 5.7. Моделирование размерных цепей

При проектировании процессов сборки или механической обработки узлов деталей на практике широко используется теория размерных цепей. Метод расчета размерных цепей позволяет обеспечить размерную взаимозаменяемость. Размерной цепью называется замкнутая цепь взаимосвязанных размеров, относящихся к одной или нескольким деталям и координирующих относительное положение поверхностей или осей этих деталей.

Любая размерная цепь может быть представлена в виде ориентированного графа, в котором вершинами будут поверхности, линии и точки, соединяемые размерами, а ребрами (дугами) – эти размеры. Самая простая размерная цепь состоит из трех звеньев, что представляет замкнутый контур (рис. 5.7).

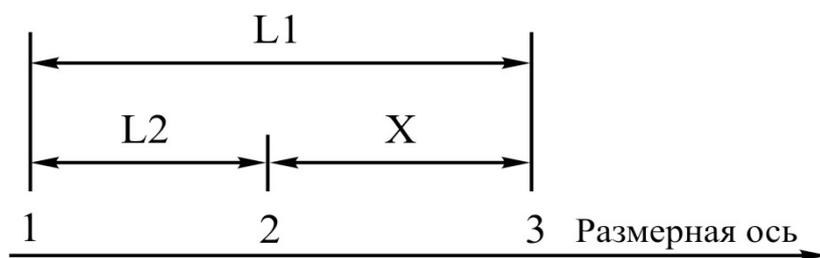


Рис. 5.7. Размерная цепь

Графом  $G$  такой цепи будет ориентированный одноконтурный граф (рис. 5.8).

Направление ребер графа соответствует направлению размеров по размерной оси. Если в таком графе удалить одно из ребер, соответствующее замыкающему звену размерной цепи, то получим дерево  $L$  графа  $G$  (рис. 5.9).

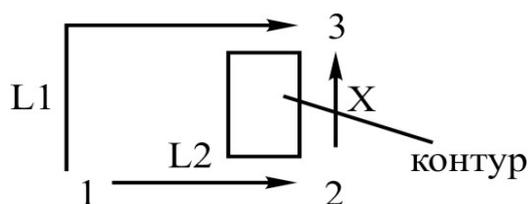


Рис. 5.8. Одноконтурный граф

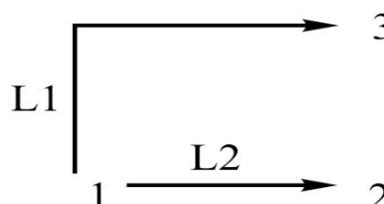


Рис. 5.9. Дерево  $L$  графа  $G$

Удаленное ребро  $X$  называется хордой дерева  $L$ . Для того, чтобы составить уравнение размерной цепи (рис. 5.7) для замыкающего звена  $X$ , нужно найти основной контур ( $f$ -контур), образованный хордой и единственным путем в дереве  $L$  графа  $G$ , причем следует иметь в виду, что направление обхода контура определяется направлением хорды. При этом для ветвей дерева, не совпадающих с направлением обхода, значения размеров войдут в уравнение размерной цепи с отрицательным знаком, а для тех, которые совпадают с направлением обхода с положительным. Таким образом для графа, представленного на рис. 5.8, уравнение размерной цепи в неявной форме имеет вид

$$X - L1 + L2 = 0 \text{ или } X = L1 - L2$$

для замыкающего звена  $X$  в явной форме.

Существует два основных метода расчета размерных цепей: вероятностный метод и метод «максимума – минимума». Первый метод имеет высокую точность, но требует громоздких вычислений. Чаще для ориентировочной оценки точности замыкающего звена размерной цепи используют более простой метод «максимума – минимума».

В общем виде расчет одной размерной цепи на «максимум – минимум» можно представить в виде

$$X = \sum_{i=1}^m L_i^{y^g} - \sum_{i=m+1}^{n-1} t_i^{y^M},$$

где  $L_i^{y^g}$  – номинальный размер  $i$ -го увеличивающего звена;  $L_i^{y^M}$  – номинальный размер  $i$ -го уменьшающего звена;  $X$  – номинальный размер замыкающего звена;  $m$  – число увеличивающих звеньев;  $n$  – общее число звеньев цепи (в том числе и замыкающее).

$$BO(X) = \sum_{i=1}^m BO(L_i^{y^g}) - \sum_{i=m+1}^{n-1} BO(L_i^{y^M});$$

$$HO(X) = \sum_{i=1}^m HO(L_i^{y^g}) - \sum_{i=m+1}^{n-1} HO(L_i^{y^M}),$$

где  $BO$  – верхнее отклонение звена;  $HO$  – нижнее отклонение звена.

Размерные цепи, описывающие деталь или узел, могут представлять собой систему цепей.

Рассмотрим узел (рис. 5.10) с операционными припусками, снимаемыми на различных этапах механической обработки. С допусками на чертеже нанесены заданные по чертежу размеры, а остальные – операционные линейные размеры – в порядке их получения при обработке. Задавая положительное направление на оси размеров (слева направо), систему размерных цепей, изображенную на рис. 5.10, можно представить как ориентированный граф  $G$  (рис. 5.11), в котором направление ребер соответствует направлению размеров по размерной оси.

Такой граф обладает рядом свойств:

- он всегда связанный (иначе некоторые размеры деталей нельзя определить);

- он содержит дерево  $L$  (всякий конечный связанный граф содержит дерево), для которого хорды  $X$  (соответствующие замыкающим звена  $X$  цепи) образуют систему основных контуров ( $f$ -контуров) графа.

Системой основных контуров графа  $G$  для дерева  $L$  называется система из  $e-v-1$  контуров, каждый из которых образуется соответствующей хордой и единственным путем в дереве, причем направление обхода контура совпадает с ориентацией хорды.

Здесь  $e$  – число ребер графа  $G$ ,  $V$  – число вершин графа  $G$ .

Всякий ориентированный граф  $G$  можно записать с помощью матрицы инцидентности  $R$ , а систему основных контуров – с помощью матрицы основных контуров  $B_f$  графа  $G$  для заданного дерева  $L$ .

Размерная цепь представляет собой  $f$ -контур ориентированного графа  $G$  для дерева  $L$ . Контур ориентированного графа  $G$  можно представить в виде контурной матрицы  $B$ .

Контурная матрица  $B = \|b_{ij}\|$  направленного графа  $G$  с  $V$  вершинами и  $e$  ребрами – это матрица с конечным числом строк и числом столбцов, равным  $e$ , где  $b_{ij} = 1$ , если ребро  $j$  принадлежит контуру  $i$  и их направления совпадают;

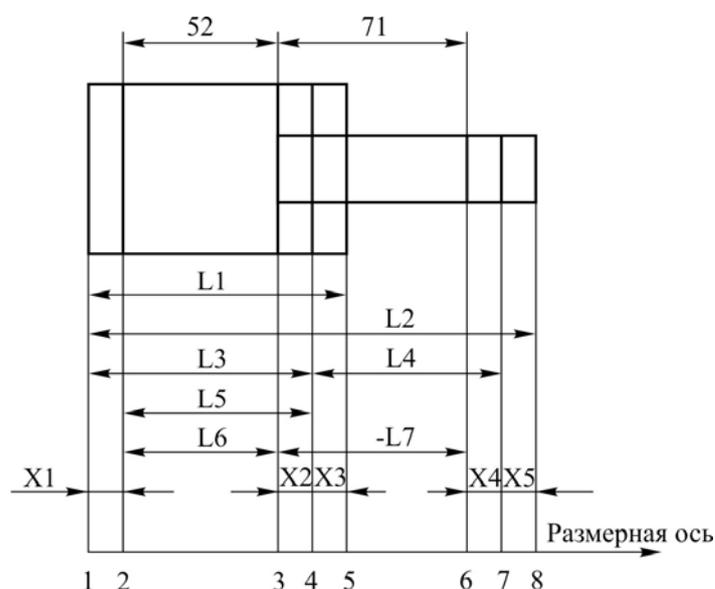


Рис. 5.10. Размерная цепь (система цепи)

$b_{ij} = -1$ , если ребро  $j$  принадлежит контуру  $i$  и их направления противоположны;  $b_{ij} = 0$ , если ребро  $j$  не принадлежит контуру  $i$ .

Матрица основных контуров  $B_f$  графа  $G$  по отношению к дереву  $L$  – это подматрица контурной матрицы  $B$ ,

$$B_f = \|JBf\|,$$

где  $J$  – единичная матрица, порядка  $e - V + 1$ , определяющая ранг матрицы  $B_f$ ;



$$Bf\bar{T}_0 = 0 ,$$

где  $X$  – матрица-столбец  $(e - v + 1) = 1$ , элементами которой являются номинальные размеры замыкающих звеньев системы размерных цепей;  $T$  – матрица-столбец  $(1 - v)^*1$ , элементами которой являются номинальные размеры составляющих звеньев системы размерных цепей;

$$\bar{T}_0 = \|\bar{X} / T\| \text{ – матрица-столбец.}$$

Чтобы представить граф  $G$  в форме, удобной для ввода в компьютер, введем понятие модифицированной матрицы инцидентий. Для этого произвольно пронумеруем все  $V$  вершины графа  $G$  числами натурального ряда от 1 до  $V$ .

Определение: Модифицированная матрица инцидентий  $A$  = ориентированного ряда  $G$  с  $V$  вершинами и  $r$  ребрами есть матрица порядка  $2r$ , где «-», если ребро  $j$  совпадает с вершиной, имеющей номер  $n$ , и направлено от нее; «+» если ребро  $j$  совпадает с вершиной, имеющей номер  $m$ , и направлено к ней:

$$1 \leq n \leq v; 1 \leq m \leq v; 1 \leq r \leq 2.$$

Согласно определению модифицированная матрица инцидентий графа  $G$ , изображенного в работе графа, будет иметь вид

$$A = \begin{array}{cc} \begin{array}{ccccc} X1 & X2 & X3 & X4 & X5 \end{array} & \begin{array}{ccccccc} T1 & T2 & T3 & T4 & T5 & T6 & T7 \end{array} \\ \left| \begin{array}{cccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right. & \left. \begin{array}{ccccccc} 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{array} \right| \\ \begin{array}{ccccc} Ax & & & & \end{array} & \begin{array}{ccccccc} At & & & & & & \end{array} \end{array}$$

Модифицированную матрицу  $A$  можно представить в виде двух модифицированных подматриц: подматрицы хорд  $A_x$  и подматрицы деревьев  $A_t$ ;

$$\bar{A} = \|\bar{A}_x \cdot \bar{A}_t\|.$$

Подматрицы  $A_x$  и  $A_t$  определяются аналогично определению матрицы  $A$  и имеют вид

$$\bar{A}_x = \|a_{rp}\|, e - v + 1;$$

$$A = \left\| a_{aq} \right\|_{r, v-1},$$

где  $1 \leq n \leq v; 1 \leq m \leq v; 1 \leq r \leq 2$ .

В математической формулировке задача качественного анализа размерной цепи ставится следующим образом: для ориентированного конечного графа  $G$ , заданного матрицей  $A$ , найти матрицу основных контуров  $Bf$  относительно дерева  $L$ .

Обозначения:

Натуральная матрица  $Bf = A$ ;  $HP=B$  ;  $HP'=W$ ;  $HO=C$  ;  $HO'=Y$ ;  $BO=Z$ ;  $BO'=U$ .

Расчетная формула:

$$\bar{X} = -\left\| Bf \right\| * \left| \bar{T} \right|,$$

где  $\left| \bar{T} \right|$  – матрица-вектор известных размеров  $|HP, HO, BO|$ ;  $\bar{X}$  – матрица-вектор искомых размеров  $|HP', HO', BO'|$ ;  $Bf$  – преобразованная контурная матрица;  $Bf = \left\| 1 * Bf \right\|$ .

---

---

## 6. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЭС

---

---

### 6.1. Расчет тепловых режимов ЭС

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. условия эксплуатации. Расчет тепловых режимов включает расчет тепловой характеристики, которая представляет собой зависимость температуры блока (или его поверхности) от величины мощности, рассеиваемой блоком.

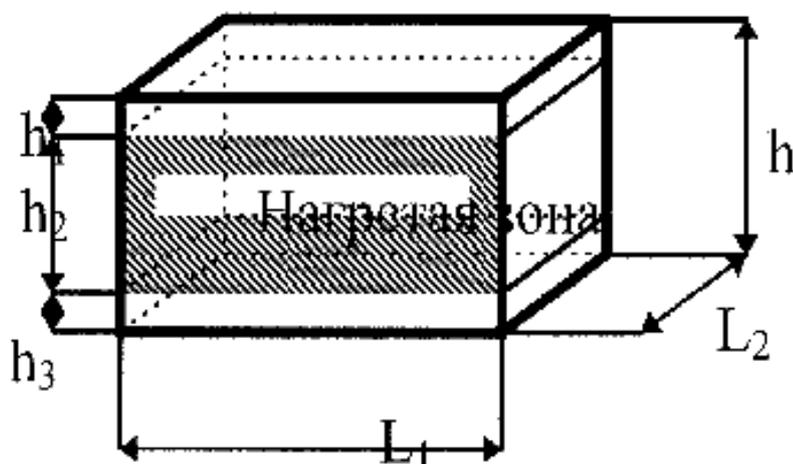


Рис. 6.1. Схематическая тепловая модель электронного блока

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. 6.1):

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

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.

#### 1. Расчет герметичных блоков

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, м<sup>2</sup>;

$l_1, l_2$  – длина и ширина шасси, см;

$S_1, S_3$  – площади внутренних поверхностей крышки и дна кожуха, м<sup>2</sup>;

$S_{III}$  – площадь шасси, м<sup>2</sup>;

$h_1, h_2, h_3$  – 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;

$\varepsilon_{и1}, \varepsilon_{и2}$  – степень черноты нагретой зоны блока сверху и снизу;

$\Delta$  – толщина материала кожуха;

$H$  – давление окружающей среды (классификация условий работы представлена в табл. 6.1).

**Таблица 6.1. 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
Центробежное ускорение, g	-	-	-	-	6	9	-
Свободное падение на грунт с высоты, м	-	500	150-500	-	-	-	-
Ветер со скоростью, м/с	30	30	30	30	-	-	10
Относительная влажность, %	98	98	98	98	98	98	98
Температура, °С	30	40	40	40	40	40	40
Изменение температуры, °С	-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	-

Группа 1 – радиоаппаратура в открытых наземных и наземных помещениях с повышенной относительной влажностью. Для корабельной аппаратуры, расположенной на верхней палубе.

Группа 2 – аппаратура в специально оборудованных отапливаемых во время работы помещениях.

Группа 3 – аппаратура, находящаяся в неотапливаемых помещениях.

Группа 4 – аппаратура в танках.

Расчет зависимости  $t = f(P)$  в первом приближении

Определяем геометрические размеры:

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

$$l_2 = L_2 - 2\Delta; S_{21} = S_{23} = l_1 \cdot l_2,$$

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;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup> град;  $S$  – площадь поверхности кожуха, м<sup>2</sup>.

Для расчета температуры в первом приближении принимаем

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

и задаемся перегревом кожуха, тогда

$$\Delta t_k = t_k - t_{c(сред)}; t_k = \Delta t_k + t_c,$$

где  $\Delta t_k$  – температура перегрева кожуха относительно окружающей среды, °С

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

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

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

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  представляет собой сумму двух коэффициентов, значение одного из которых определяется характером конвективных потоков, а другой – излучением поверхности кожуха:

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

Коэффициент теплоотдачи излучения определяется зависимостью

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

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

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

Таблица 6.2. Степень черноты материалов ЭС

Материал	Температура, °С	$\varepsilon$
Алюминий:		
Нормально прокатанный	100	0,062
Грубо полированный	100	0,18
Листовой коммерческий	100	0,09
Шероховатый	20-50	0,055-0,07
Алюминий литейный (АЛ-3÷АЛ-9):		
Литье в песчаную форму	100	0,23
Литье в кокиль	100	0,16
Сталь:		
Листовая шлифованная	100	0,5-0,6
Листовая прокатная	20	0,66
Сталь окисленная	25	0,82
Литая гладкая	23	0,8
Никелированная неполированная	25	0,11
Чугун:		
Полированный	200	0,21
Свежеобточенный	22	0,44
Сильно окисленный	40-250	0,95
Резина	23	0,11
Латунь:		
Тщательно полированная	100-300	0,028-0,03
Прокатная	22	0,06
Тусклая	50-350	0,22
Окисленное листовое железо	24	0,28
Лаки, краски:		
Белый эмалевый лак	23	0,906
Черный лак	93	0,8-0,96
Черный матовый лак	40-100	0,96-0,98
Масляные краски всех цветов	100	0,92-0,96

Здесь  $\varepsilon$  – степень черноты поверхности тела, представлена в табл. 6.2;  $C_0$  – коэффициент лучеиспускательной (поглощательной) способности абсолютно черного тела,  $C_0=5,73 \cdot 10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup>град<sup>4</sup>.

Для облегчения расчета  $f(t_k, t_c)$  в табл. 6.3 приведены её значения.

Конвективные слагающие коэффициента теплоотдачи зависят от ориентации поверхностей в пространстве.

Таблица 6.3. Значения функции  $f(t_k, t_c)$

$t_c, ^\circ\text{C}$	$t_k, ^\circ\text{C}$											
	5	10	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
50	6,20	6,35	6,67	6,83	7,00	7,35						
60	6,65	6,70	7,04	7,19	7,33	7,69	8,05					
70	6,90	7,06	7,39	7,55	7,72	8,05	8,42	8,80				
80	7,27	7,44	7,75	7,80	8,07	8,45	8,83	9,20	9,62			
90	7,63	7,82	8,13	8,31	8,49	8,86	9,25	9,65	10,03	10,46		
100	8,03	8,19	8,57	8,72	8,91	9,28	9,66	10,08	10,49	11,91	11,36	
110	8,43	8,60	8,97	9,15	9,33	9,71	10,10	10,51	10,93	11,38	11,82	12,3
120	8,85	9,02	9,40	9,56	9,77	10,17	10,56	11,01	11,42	11,87	12,31	12,8

Для боковой поверхности

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

Для крышки кожуха

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

Для дна кожуха

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

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  $\alpha_k$ , если условия эксплуатации отличаются от нормальных условий.

Условия, при которых  $H=10322$  кг/м<sup>2</sup> (110 кПа) и  $t=20^\circ\text{C}$ , 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. 6.2, 6.3, 6.4.

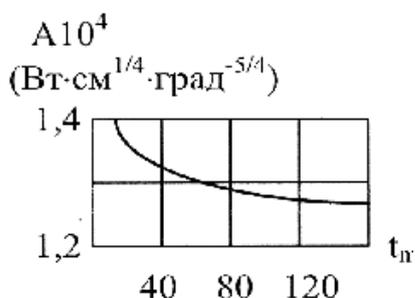


Рис. 6.2. Зависимость коэффициента  $A=f(t_m)$

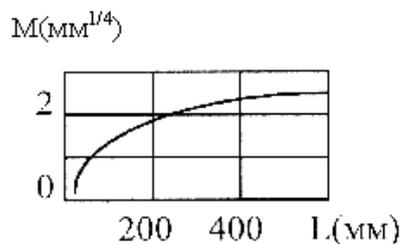


Рис. 6.3. Зависимость коэффициента  $M=f(L)$

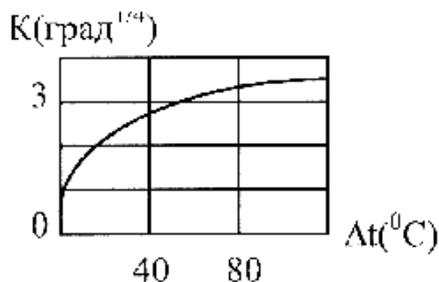


Рис. 6.4. Зависимость коэффициента  $K=f(\Delta t)$

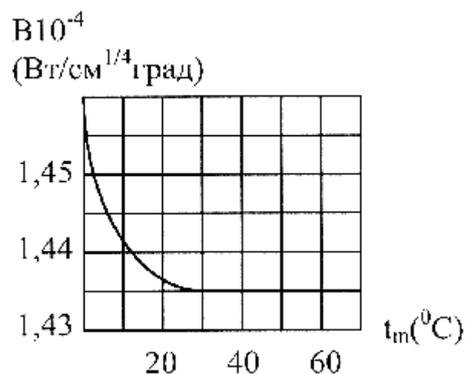


Рис. 6.5. Зависимость коэффициента  $B=f(t_m)$

При расчете  $\alpha_{кб}$  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:

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

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:

$$P = P_{кр} + P_{дн} + P_{бок};$$

$$t_{из}^I = t_k + 2,5 \cdot \Delta t.$$

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

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

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 рис. 6.2, 6.3, 6.4 соответствуют закону 1/4.

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

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

где  $A$  – коэффициент, зависящий от температуры (см. табл. 6.4).

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

Таблица 6.4. 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

Общая мощность

$$P = P_k + P_{изл}..$$

На этом заканчивается расчет первого приближения.

*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  $\varepsilon$  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 ( $\varepsilon_{np}$ ).

Найдем  $\varepsilon_{np}$  для отсеков блока:

$$\varepsilon_{np1} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{\left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right) \cdot S_{21}}{S_1}} ; \quad \varepsilon_{np3} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{\left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right) \cdot S_{23}}{S_2}} ;$$

$$\varepsilon_{np2} = \varepsilon_{np1} \cdot \varepsilon_{np3}.$$

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

$$\text{для верхнего отсека} \quad \alpha_{л1} = \varepsilon_{np1} f_1(t_{ut}^1 t_k);$$

$$\text{для нижнего отсека} \quad \alpha_{л3} = \varepsilon_{np3} f_1(t_{ut}^1 t_k);$$

$$\text{для нагретой зоны} \quad \alpha_{л2} = \varepsilon_{np2} f_1(t_{ut}^1 t_k).$$

Значение функции  $f_1$  берется из табл. 6.4, в которой 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

$$\alpha_{K_1} = B \cdot 4 \sqrt{\frac{\Delta t}{h_1}} \cdot \sqrt{\frac{H}{H_0}},$$

где  $\alpha_{K_1} = \alpha_{K_2}$ , так как шасси ориентировано горизонтально;  $B$  – величина, характеризующая свойства воздуха в зависимости от средней температуры  $t_m$ , график зависимости показан на рис. 6.5.

Здесь

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

Для нижнего отсека  $\alpha_{к.дн} = \frac{\lambda_{возд}}{h_3}$ ,

где  $\lambda_{возд}$  – коэффициент теплопроводности воздуха.

Далее находим полный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_1 = \alpha_{ли} + \alpha_{ки}.$$

После чего определяем тепловые проводимости кожуха и зоны по формуле:

$$\sigma_k = \sum_i \alpha_i \cdot S_{ki};$$

где  $S_{ki} = S_{кр} + S_{дн} + S_{бок}$ ;  $\sigma_k = 23(L_1 - 2\Delta) \cdot (L_2 - 2\Delta)$ .

Далее находим температуру зоны во втором приближении:

$$t_{II}^{II} = t_c + P \times \left( \frac{1}{\sigma_3} + \frac{1}{\sigma_k} \right).$$

Если температура зоны  $t_{II}^{II}$  значительно отличается от температуры  $t_{II}^I$ , то расчет повторяется в третьем приближении по методике второго приближения. Допустимое значение отличия температур составляет 2...3 °С.

Вторая точка тепловой характеристики находится аналогично, но при другой выбранной температуре перегрева кожуха –  $\Delta t_k$ . По найденным точкам строится тепловая характеристика

$$\Delta t_{II} = f(P) \text{ и } \Delta t_k = f(P)$$

и определяется перегрев блока при определенной заданной мощности блока  $P$ .

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

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

Отверстия нужно располагать при этом симметрично нагретой зоны 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 %.

Основные формулы для расчёта тепловых режимов ЭС даны ниже.

## 6.2. Расчёт системы амортизации ЭС

Целью расчета являются:

- определение частоты собственных колебаний системы  $f_0$ ;
- определение параметров вынужденных колебаний;
- амортизируемого блока по известным параметрам колебаний основания;
- установление эффективности виброизоляции выбранной системы амортизации.

При выборе амортизаторов должны быть выполнены условия, при которых общая грузоподъемность всех амортизаторов равна массе амортизируемой аппаратуры, а координаты центра тяжести ее совпадают с координатами центра тяжести амортизаторов. Напомним, что центр тяжести амортизируемого тела может быть вычислен по формулам, известным из теоретической механики, или определен экспериментально. Центром тяжести системы амортизации называется точка приложения равнодействующей параллельных сил, которые являются реакциями амортизаторов на внешнюю нагрузку и пропорциональны жесткости амортизаторов.

Конструирование системы амортизации ЭС начинают с выбора типа амортизаторов и схемы их расположения.

При выборе амортизаторов учитывают допустимые нагрузки на них и предельные значения параметров, характеризующие условия эксплуата-

ции. Принципиальная схема системы амортизации зависит в основном от характера расположения аппаратуры на объекте и условий динамического воздействия.

После выбора типа амортизаторов и схемы системы амортизаторов производят расчет статистических нагрузок на амортизаторы, а также параметров собственных и вынужденных колебаний амортизируемой аппаратуры. На основании данных расчета выбираются типоразмер амортизаторов. Затем уточняется схема расположения амортизаторов.

В результате вибрационного расчета определяются частота свободных или собственных колебаний амортизируемой аппаратуры  $f_0$ , амплитуда перемещения или ускорения вынужденных колебаний  $A$ , а также эффективность виброизоляции.

Ниже рассмотрим пример расчета системы амортизации с одной степенью свободы. Предварительно запишем некоторые математические выражения, которые используем при расчете.

### 6.3. Система амортизации с одной степенью свободы

Такую систему можно приближенно рассматривать как недемпфированную систему для расчета собственной частоты колебаний  $f_0$  и резонансных режимов системы амортизации.

Для определения  $f_0$  необходимо знать массу  $m$  объекта, коэффициенты жесткости  $K$  (или статические прогибы  $\delta_{cm}$ ) всех амортизаторов при статических нагрузках  $P_{\varepsilon}$ .

Тогда

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (6.1)$$

или

$$f_0 = \frac{15.8}{\sqrt{\delta_{cm}}} \quad (6.2)$$

Амплитуда вынужденных колебаний подобной системы

$$A = \frac{\xi}{\left| 1 - \frac{\Omega^2}{\omega_0^2} \right|}, \quad (6.3)$$

где  $\xi(t) = \xi \sin \Omega t$  и  $\xi$  – максимальное значение амплитуды перемещения основания (в случае кинематического возмущения);  $\Omega$  – частота возмущающих колебаний основания;  $\omega_0$  – угловая частота собственных колебаний.

С учетом вязкого демпфирования

$$A = \xi \sqrt{\frac{1 + \varepsilon^2 \eta^2}{(\eta^2 - 1)^2 - \varepsilon^2 \eta^2}}, \quad (6.4)$$

где  $\varepsilon$  – показатель затухания,

$$\varepsilon = 2h / h_{кр} = 2\xi,$$

при этом  $h$  – коэффициент демпфирования;  $h_{кр}$  – коэффициент критического демпфирования;  $\eta$  – коэффициент расстройки,

$$\eta = \Omega / \omega_0.$$

Величина амплитуды ускорения для случая гармонических колебаний с частотой  $f$  может быть определена из

$$U_m(t) = 4 \cdot \pi^2 \cdot f \cdot A. \quad (6.5)$$

Часто используется другое выражение, полученное путем деления обеих частей равенства (1.5) на величину ускорения свободного падения  $g$ .

В этом случае получаем зависимость амплитуды ускорения (ее обозначают буквой  $j$ ) в единицах  $g$ :

$$j = \frac{f^2 \cdot A}{250}. \quad (6.6)$$

Эффективность системы амортизации оценивается по значению коэффициента динамичности

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{1}{1 - \eta^2} \quad (6.7)$$

или, если демпфированием пренебречь нельзя, то

$$\frac{1}{\gamma} = \sqrt{\frac{1 + \varepsilon^2 \cdot \eta^2}{(\eta^2 - 1)^2 - \varepsilon^2 \cdot \eta^2}}. \quad (6.8)$$

При этом под  $1/\gamma$  понимается величина, показывающая, во сколько раз амплитуда вынужденных колебаний больше или меньше амплитуды возмущающих колебаний основания системы (рис. 6.6).

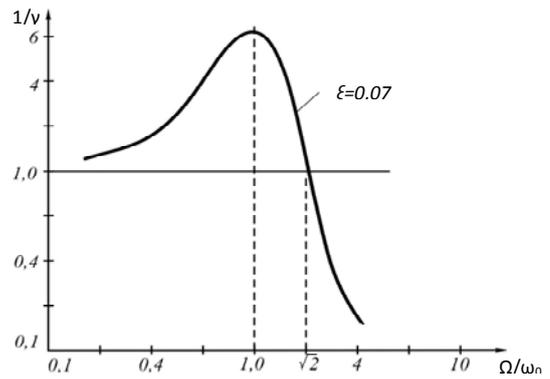


Рис. 6.6 График полученных данных

*Пример:* Амортизируемый блок весом  $G = 21\text{Н}$  установлен на три амортизатора, координаты двух из них определены конструктивно:  $x_1=10\text{ см}$ ;  $x_2 = -8\text{ см}$ ;  $z_1 = 10\text{ см}$  и  $z_2 = 5\text{ см}$ . Третий амортизатор может быть установлен на расстоянии  $z_3=-8\text{ см}$  от оси, проходящей через центр тяжести блока (0-центр тяжести блока) (рис. 6.7).

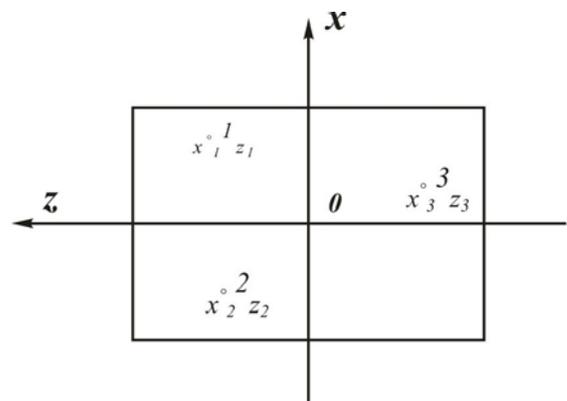


Рис. 6.7. Схема системы амортизации блока

Требуется определить нагрузки на амортизаторы, а также выбрать положение третьего амортизатора так, чтобы координата центра тяжести блока совпала с центром жесткости амортизаторов.

Кроме того, пусть по техническим условиям должны быть установлены амортизаторы типа АД. Требуется определить собственную частоту системы и произвести оценку динамических характеристик системы при следующих условиях (табл. 6.5):

Таблица 6.5. **Вибрации, воздействующие на блок**

Частота $f_0$ , Гц	20	30	50	100	150	200
Амплитуда $\xi$ , мм	1,2	1,0	0,5	0,2	0,1	0,05

*Решение:* Сначала определим искомую координату  $x_3$ . Для этого составим уравнение статики:

$$P_1+P_2+P_3=G;$$

$$x_1P_1+x_2P_2+x_3P_3=0;$$

$$z_1 P_1 + z_2 P_2 + z_3 P_3 = 0;$$

$$z_1 x_1 P_1 + z_2 x_2 P_2 + z_3 x_3 P_3 = 0,$$

где  $P_1, P_2, P_3$  – соответствующие нагрузки на амортизаторы.

Отсюда определяем:

$$x_3 = \frac{x_1 \cdot x_2 \cdot z_3 \cdot (z_1 - z_2)}{x_2 \cdot z_1 \cdot (z_3 - z_2) - x_1 \cdot z_2 \cdot (z_3 - z_1)} = \frac{10 \cdot 8 \cdot 8 \cdot 5}{10 \cdot 8 \cdot 13 + 10 \cdot 5 \cdot 18} = 1,65 \text{ см};$$

$$P_2 = \frac{z_3 x_2 - x_3 z_2}{(z_3 - z_1)(x_2 - x_1) - (x_3 - x_1)(z_2 - z_1)} G =$$

$$= \frac{8 \cdot 8 - 1,65 \cdot 5}{18 \cdot 18 + 1,65 \cdot 5} G = 0,198 G = 0,415 \cdot 10 H;$$

$$P_3 = \frac{z_1 x_3 - x_1 z_3}{(z_3 - z_1)(x_2 - x_1) - (x_3 - x_1)(z_2 - z_1)} G =$$

$$= \frac{10 \cdot 1,65 + 10 \cdot 8}{282,25} G = 0,460 \cdot G = 0,965 \cdot 10 H;$$

$$P_1 = \frac{5 \cdot 10 + 8 \cdot 10}{282,25} \cdot G = 0,460 \cdot G = 0,965 \cdot 10 H.$$

Учитывая нагрузку на каждый амортизатор, устанавливаем в точке 1 амортизатор АД-06, а в точках 2 и 3 – АД-1,0.

Тогда

$$\delta_{1 \text{ см}} = \frac{P_1}{K} = \frac{0,415 \cdot 10}{1,7} = 2,45 \text{ мм}; \quad \delta_{2 \text{ см}} = \frac{0,720 \cdot 10}{2,0} = 3,6 \text{ мм};$$

$$\delta_{3 \text{ см}} = \frac{0,965 \cdot 10}{2,0} = 4,82 \text{ мм}.$$

Разницу в прогибах необходимо скомпенсировать шайбами или прокладками.

Суммарная жесткость системы

$$K_{\Sigma} = 1,7 + 22,0 = 5,7 \text{ Н/мм}.$$

Собственная частота системы

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{5,7 \cdot 9810}{21}} = 8,2 \text{ Гц}.$$

Перейдем к оценке динамических характеристик системы (табл. 6.6).  
Учитывая данные таблицы 6.5, определим для 20Гц по (6.6)

$$A_{20} = \frac{1,2}{1 - \frac{20^2}{8,2^2}} = 0,242 \text{ мм.}$$

В соответствии с (6.6)

$$j = \frac{20^2 \cdot 0,242}{230} = 3,9 \cdot g.$$

Коэффициент динамичности в соответствии с (6.7)

$$\frac{1}{\gamma} = \left| 1 - \frac{20^2}{8,2^2} \right|^{-1} = 0,242.$$

**Таблица 6.6. Данные расчета для всего диапазона**

f, Гц	20	30	50	100	150	200
$\frac{1}{\gamma}$	0,242	0,081	0,028	0,007	0,003	0,002
$\eta = \Omega / \omega_0$	2,44	3,66	6,12	12,4	18,3	24,5
A, мм	0,242	0,083	0,014	0,001	0,00203	0,0001

При этом для самой большой частоты вибрации  $f = 20$  Гц по отношению к  $f_0 = 8,2$  Гц имеем запас по частоте (с учетом  $\sqrt{2}$ ), равный 1,7 раза.

#### **6.4. Защита ЭС от воздействия влаги**

Герметизация – обеспечение практической непроницаемости корпуса ЭС для жидкостей и газов с целью защиты ее элементов и компонентов от влаги, пыли, плесневых грибков, грязи и механических повреждений. Перед конструктором ЭС в общем случае стоят 3 задачи:

1. Обеспечить возможность монтажа, ремонта и контроля ЭС внутри герметизируемого объема;
2. Обеспечить ввод в герметизированный объем внешних электрических цепей.
3. Обеспечить ввод в герметизированный объем механических цепей (осей органов управления и др.).

Первая задача решается, если создать разъемную конструкцию корпуса, части которого герметично соединяются между собой после монтажа аппаратуры. Решение второй задачи связано с разработкой герметичных разъемов и способов их установки на корпусах ЭС. Третья задача наиболее сложная, т.к. в герметизируемый объем нужно вводить несколько видов движений – вращательное, поступательное и комбинированное. Имеющиеся методы герметизации, используемые для защиты неподвижных соединений, не могут обеспечить надежную работу таких устройств. В результате приходится разрабатывать дорогостоящие специальные конструкции.

Решение всех трех задач сводится к созданию разъемных соединений, непроницаемых для окружающей среды.

*Способы создания неподвижных разъемных герметичных соединений.* Известно, что любая поверхность имеет определенную шероховатость, которая характеризуется высотой микронеровностей. При соприкосновении имеют место микроканалы, через которые возможно проникновение среды из одного объема в другой (рис. 6.8).

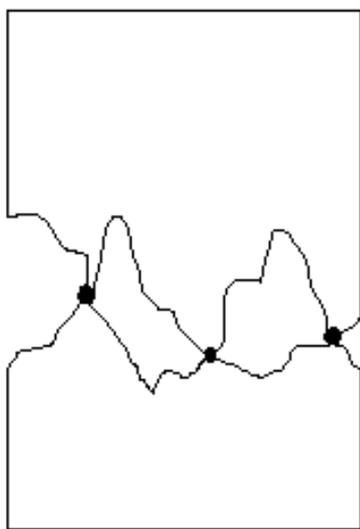


Рис. 6.8. Контакт двух поверхностей

Устранение этих микроканалов возможно двумя способами:

Устранение этих микроканалов возможно двумя способами:

- снижением степени шероховатости контактирующих поверхностей (уменьшение высоты микронеровностей);
- сжатием поверхностей усилиями, при которых напряжения в выступах достигают предела текучести, т.е. происходит слияние поверхностей, а значит, перекрытие микроканалов.

Первый путь требует трудоемкой операции шлифовки, притира, что увеличивает

затраты. Повышение усилия сжатия требует увеличения жесткости всей конструкции, что ведет к увеличению массы.

Решаются эти задачи применением шайбы между поверхностями для уменьшения усилия сжатия. Схема уплотнения неподвижного соединения имеет вид, показанный на рис. 6.9.

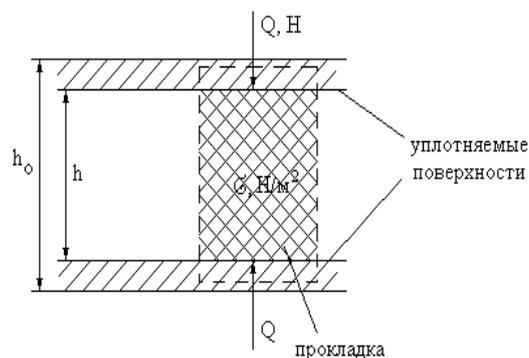


Рис. 6.9. Схема уплотнения

К уплотняемым поверхностям прикладывается сжимающее усилие  $Q$ , которое вызывает деформацию прокладки на величину  $h_0 - h$ , что приводит к возникновению контактного напряжения  $\sigma$  на границе раздела.

Под действием этих напряжений материал прокладки заполняет микронеровности уплотняемых поверхностей, обеспечивая герметичное соединение. Прокладки воспринимают перепад давлений между внешней средой и герметизируемым объемом.

Имеется критическое давление  $P_{кр}$ , при котором наступает разгерметизация соединения. Эту величину определяют следующим образом.

Сила трения равна произведению силы нормального давления  $Q$  на коэффициент трения  $\mu$ :

$$F_{тр} = \mu \cdot Q.$$

Для рис. 6.9 
$$Q = \sigma_m \cdot S.$$

Сила, действующая на прокладку в радиальном направлении, равна произведению перепада давления сред  $P_{вн} - P_{нар}$  на площадь действия давления, равную для плоской прокладки  $\pi Dh$ , где  $D$  – внутренний диаметр прокладки;  $h$  – высота деформированной прокладки.

Используя условие равенства сил трения и давления, имеем:

$$2\mu \cdot \sigma_m \cdot S = \pi \cdot Dh (P_{вн} - P_{нар}),$$

откуда

$$P = (P_{вн} - P_{нар}) = \frac{2\mu \cdot \sigma_m \cdot S}{\pi \cdot Dh}.$$

Для практических расчетов пользуются формулой в другом виде:

$$P_{кр} = k_y \cdot \sigma_m,$$

где  $k_y$  – коэффициент устойчивости уплотнения

$$k_y = \frac{2\mu \cdot S}{\pi \cdot Dh} = 2\mu \cdot \phi,$$

где  $\phi$  – коэффициент формы (рис. 6.8)  $\phi = \frac{e_0}{2h_0}$ .

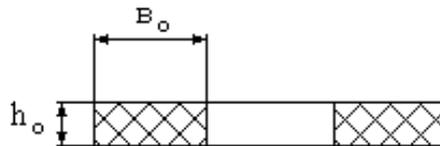


Рис. 6.10. Прокладка для герметизации

После достижения критического давления происходит скачкообразное разуплотнение соединения. Это объясняется тем, что первоначальный небольшой сдвиг прокладки в радиальном направлении вызывает уменьшение величины контактных напряжений  $\sigma_m$ , что является следствием нежесткости резины и приводит к падению силы трения на контактирующих поверхностях, что способствует еще большему смещению прокладки, и так до полной разгерметизации.

При проектировании герметичных соединений стремятся повысить величину критического давления  $P_{кр}$ . Для этого:

- увеличивают контактные напряжения на  $\sigma_m$  границе раздела;
- увеличивают площадь контактирования  $S$ ;
- увеличивают коэффициент трения  $\mu$ ;
- ограничивают возможность перемещения прокладки в радиальном направлении.

Увеличивают  $\sigma_m$  там, где нет повышения степени ее деформации. Однако при значениях  $\epsilon > 40\%$  резина перенапрягается и снижается срок ее службы.

Увеличивать трение можно ухудшая обработку, но это ведет к увеличению контактных напряжений.

*Самоуплотнение в герметичных соединениях.* Самоуплотнение – эффект, при котором уплотняемая среда передает часть давления через

прокладку на фланцы, увеличивая тем самым контактные напряжения. Этот эффект возможен при радиальном смещении прокладки и ее плотном прилегании к стенкам канавки. На рис. 6.11 показана диаграмма работы соединения в режиме самоуплотнения.

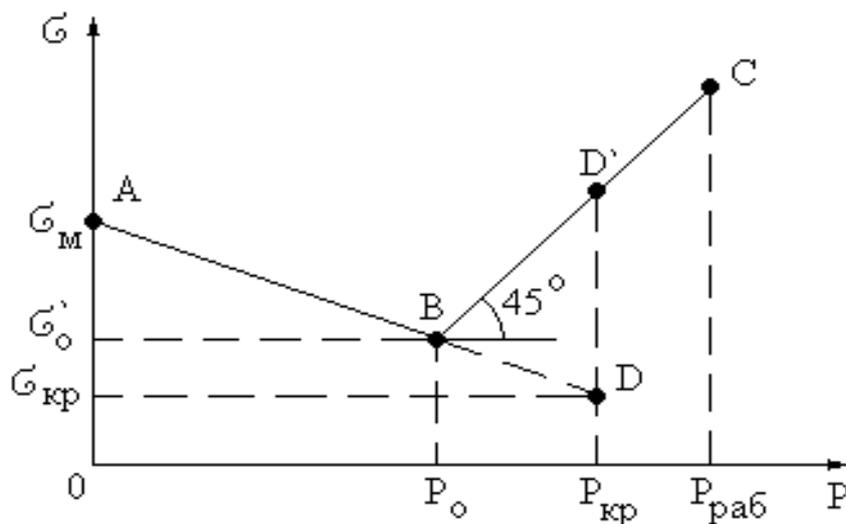


Рис. 6.11. Диаграмма работы соединения в режиме самоуплотнения:  
 $P$  – давление среды;  $\sigma$  – контактное напряжение

При повышении давления от 0 до  $P_{кр}$  прокладка неподвижна. При  $P=P_{кр}$  происходит скачкообразное перемещение прокладки в стенки канавки, при этом контактное напряжение изменяется по кривой ABD. В точке B наступает режим самоуплотнения. Участок BC характеризует режим самоуплотнения.

*Смазка в узлах уплотнения.* Применение смазки в узлах уплотнения приводит к резкому снижению трения. Без смазки трение резины по стали составляет  $\mu = 0,4 \dots 0,6$ , с введением смазки  $\mu = 0,06 \dots 0,1$ . Снижение трения в узлах уплотнения по-разному влияет на качество герметичного соединения.

Снижение трения в прокладках, использующих смазки, понижает критическое давление, при котором наступает разгерметизация. Значит, смазка здесь уже нерациональна. При самоуплотнении снижение коэффициента трения играет положительную роль, обеспечивая самоуплотнение при более низких перепадах давления.

*Влияние низких температур на герметичность контактных уплотнений.* Резиновые прокладки чувствительны к воздействию низких

температур. Деформация высокоэластичных материалов имеет две составляющие – высокоэластичную  $\varepsilon_{вэл}$  и упругую  $\varepsilon_{упр}$ , при нормальных условиях они связаны так:

$$\varepsilon_{вэл} \gg \varepsilon_{упр}.$$

С понижением температуры происходит повышение величины модуля резины  $E$ , который становится равным бесконечности при определенной отрицательной температуре, называемой температурой стеклования  $T_c$  резины. При температурах ниже  $T_c$  резина полностью теряет свои высокоэластичные свойства и деформируется как упругое твердое тело. При дальнейшем понижении температуры герметичность соединения будет определяться значениями температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) входящих в него материалов. ТКЛР резины где-то на порядок выше, чем у металлов:

$$\alpha_{рез} = (20..67) \cdot 10^{-5} \text{ 1/K};$$

$$\alpha_{ст} = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K},$$

поэтому при температурах близких к  $T_c$  происходит разгерметизация.

*Долговечность контактных уплотнений.* Работоспособность герметичных соединений зависит не только от температуры среды, но и от времени эксплуатации. Резине как высокоэластичному материалу свойственна релаксация, т.е. снижение первоначальных напряжений с течением времени, что объясняется перестройкой внутримолекулярной структуры деформированной массы из неравновесного состояния в равновесное (рис. 6.12).

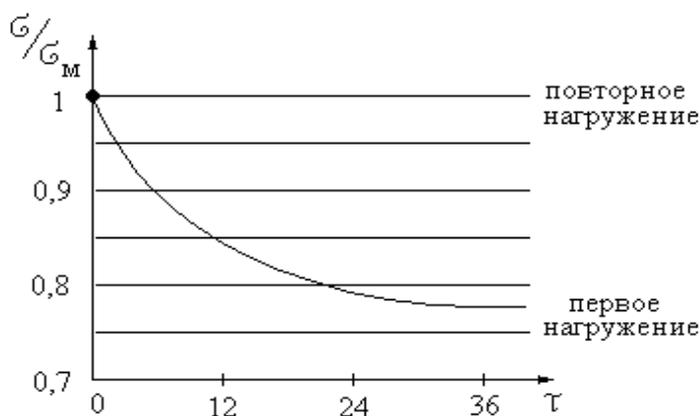


Рис. 6.12. Изменение контактных напряжений с течением времен

К материалам прокладок предъявляют ряд требований:

- низкое значение модуля упругости;
- устойчивость к воздействию высоких и низких температур;
- совместимость с материалом уплотняемых поверхностей;
- стабильность свойств во времени.

Перечисленным требованиям удовлетворяют прокладочные материалы, которые можно подразделить на 2 группы – металлические и неметаллические.

Металлические используют в тяжелых условиях эксплуатации – для герметизации сверхвысоких и сверхнизких (глубокий вакуум) давлений, для создания соединений, работающих при высоких температурах. Для этого используют материалы с низким пределом текучести  $\sigma_T$  – свинец, медь, никель.

Среди неметаллических материалов – резина. Это сложная многокомпонентная структура, состоящая из полимерной основы и различных химических добавок.

*Особенности проектирования резиновых уплотнителей.* При длительной эксплуатации, широком диапазоне изменения давлений и незначительной деформации применяют прокладки с различными конструкциями (рис. 6.13).

*Неразъемная герметизация.* При такой герметизации не применяют клей, компаунды из-за различия ТКЛР компаунда и материалов корпуса, иначе возникнут трещины или тепловой удар. Применяя неразъемную герметизацию, можно получить ЭС с большей надежностью в самых жестких условиях эксплуатации.

*Неразъемная герметизация сваркой и пайкой.* Сварка применяется плавлением (встык) и роликовая (внахлест). Хорошие результаты дает лазерная и электронно-лучевая.

Лазером сваривают тугоплавкие металлы, приваривают контакты в п/п приборах, сваривается алюминий и его сплавы, бронза и др.

Сварка в вакууме дает высокое качество шва, т.к. в процессе сварки удаляются газы, окислы, примеси.

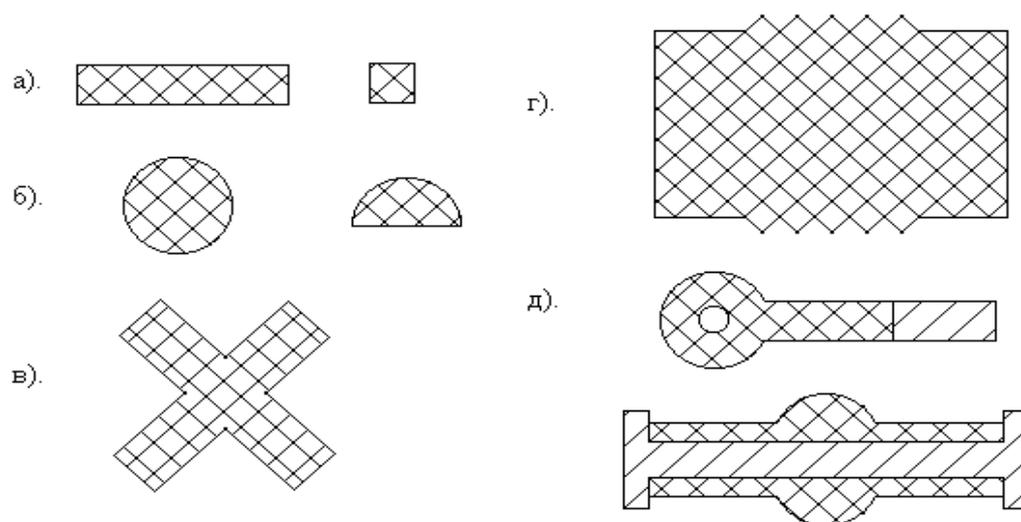


Рис. 6.13. Виды прокладок

При сварке встык сварной шов должен быть со стороны вакуума (рис. 6.14).



Рис. 6.14. Виды сварок

Электрические выводы осуществляются через проходные изоляторы. Их основными элементами являются трубка и фланец, впаянные в стеклянный изолятор. Их недостаток – чувствительность к изменению температуры.

Лучше использовать стеклокерамические или керамические изоляторы (рис. 6.15).

*Расчеты герметичности.* При конструировании герметичных изделий решаются 2 задачи:

- расчет усилия обжатия, обеспечивающего герметизацию;
- расчет утечки газа через соединения.

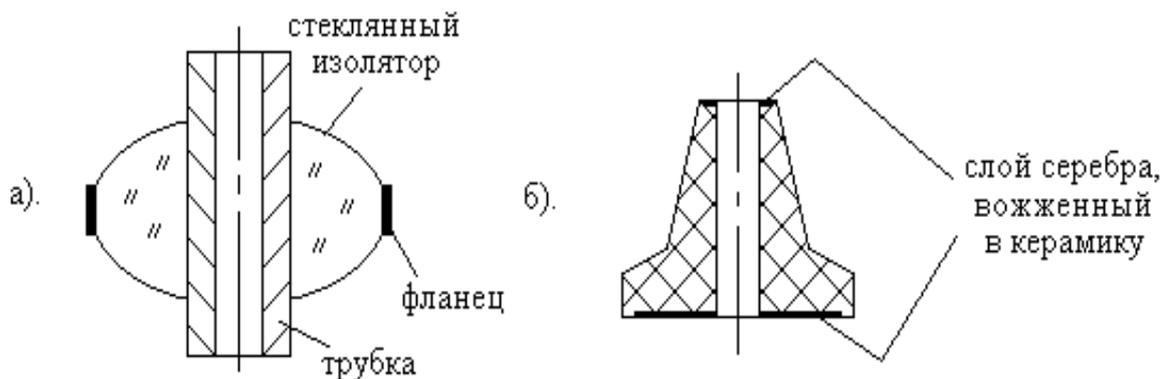


Рис. 6.15. Стеклоанный (а) и керамический (б) изоляторы

В настоящее время отсутствуют обоснованные математические модели разгерметизации разъемных соединений. Поэтому применим эмпирические формулы, справедливые только в том диапазоне изменения параметров, в котором ставился эксперимент.

Давление обжатия для различных типов соединения определяется по формулам:

для фланцевого соединения с фторопластовой прокладкой

$$q = 2,86P,$$

где  $q$  – давление обжатия;  $P$  – давление среды;

для фланцевого соединения с зубчатой прокладкой

$$q = 4\sigma_T,$$

где  $\sigma$  – предел текучести материала прокладки.

Утечка происходит через круглые капилляры и ламинарное течение через плоскую щель. Следует учитывать уменьшение утечки за счет зарастивания щели.

## 7. МОНТАЖ КОМПОНЕНТОВ ЭС

### 7.1. Внутриблочный электрический монтаж

Электрический монтаж радиоэлектронных средств возможен различными способами, в зависимости от сложности и конструктивных особенностей: кабелями, одиночными проводами, жгутами, голыми проводами, печатным монтажом, нанесением металлических покрытий и паст, поверхностным монтажом на поверхности. На рис. 7.1 показана диаграмма применяемости способов электрического монтажа.

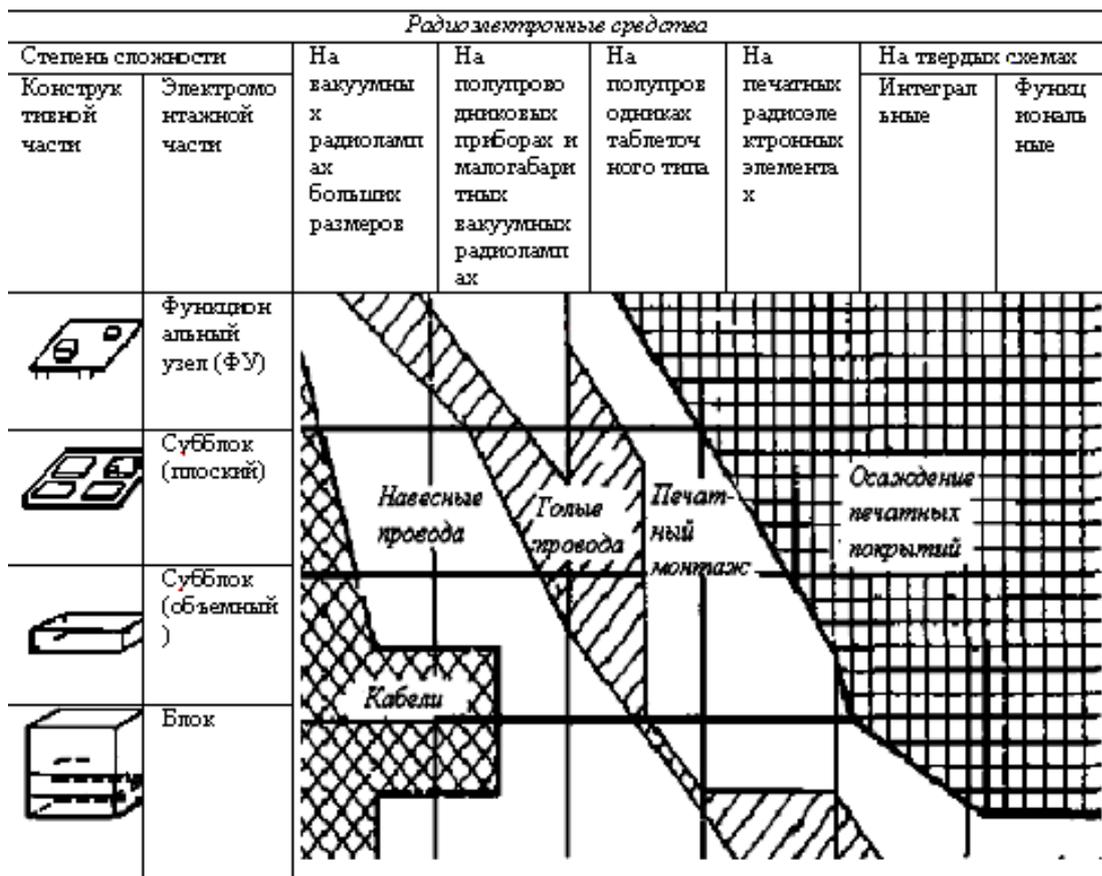


Рис. 7.1. Диаграмма применяемости различных способов электрического монтажа  
 Примечание: В – верх; Л – левая сторона; Н – низ; Т – тыл; Ф – фронт; В – длина блока;  
 Н – высота блока; L – ширина блока

Самое широкое распространение получил печатный монтаж. Печатный монтаж целесообразно использовать в сочетании со жгутовым монтажом, так как эти способы охватывают диапазон всей разрабатываемой радиоэлектронной аппаратуры. Серьезную проблему представляет внутриблочный электрический монтаж, т.е. электрические соединения между монтажными плоскостями (рис. 7.2):

вариант	Размещение монтажных плоскостей в блоке	Наиболее распространенные группы конструкций блоков			
		Способы установки монтажных плоскостей в блоке и способы соединения жгутов с эл. элементами			
	графическое изображение	вынимаемые на разъемах (1-я группа)	вынимаемые на разъемах (2-я группа)	поворачиваются вокруг одного угла, неразъемны (3-я группа)	поворачиваются, вставляются в гнезда, неразъемны (4-я группа)
1-й					
2-й					
3-й					
Расшифровка позиций		1 Плата субблока	1 Плата субблока	1 Плата субблока	1 Плата субблока
		2 Разъем	2 Пайкой	2 Пайкой	2 Пайкой
		3 Жгут	3 Жгут	3 Жгут	3 Жгут
		4 Каркас	4 Каркас	4 Каркас	4 Каркас

Рис. 7.2 Схема расположения монтажа плоскостей для различных конструкций каркасов блоков

- 1) с вынимаемыми плоскостями на разъемах (группа каркасов 1,1; 2,1 и 3,1);
- 2) с вынимаемыми неразъемными плоскостями (группа каркасов 1,2; 2,2 и 3,2);
- 3) с поворачиваемыми неразъемными плоскостями (группа каркасов 1,3; 2,3 и 3,3);
- 4) с поворачиваемыми неразъемными плоскостями, наподобие листов книги (группа каркасов 1,4; 2,4 и 3,4).

Анализ существующих конструкций показывает, что расположение монтажных плоскостей может быть поперечно-вертикальное, продольно-горизонтальное и продольно-вертикальное, оно определяет конструкцию каркасов блоков.

В зависимости от расположения монтажных плоскостей конструкции каркасов аппаратуры делят на три группы (рис. 7.2):

- 1) поперечно-вертикальные (1,1; 1,2; 1,3 и 1,4);
- 2) продольно-горизонтальные (2,1; 2,2; 2,3 и 2,4);
- 3) продольно-вертикальные (3,1; 3,2; 3,3; 3,4);

по способу соединения монтажных плоскостей с внутриблочными проводниками – на четыре группы (рис. 7.2).

Для обеспечения удобного подхода к элементам, расположенным на монтажных плоскостях, последние имеют или разъемные, или подвижные петли жгута. Разъемные соединения представляют собой розетки, выполненные в виде отдельных или групповых гнезд и ответной части в виде штырьков (вилки), печатных пластин с контактными площадками или одиночных проводов.

Во время регулировки или ремонта разъемные соединения удобны для электрической связи схемы на монтажной плоскости с внутриблочными соединениями.

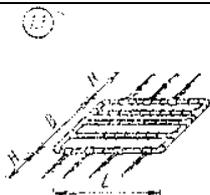
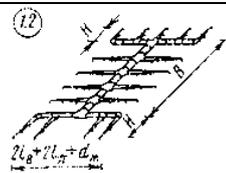
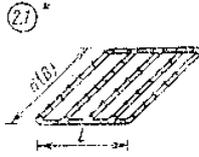
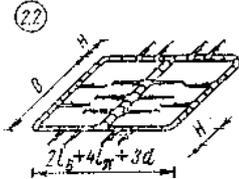
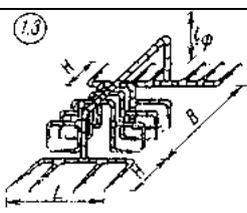
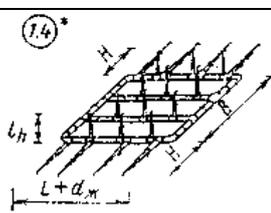
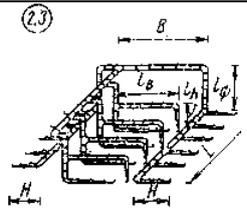
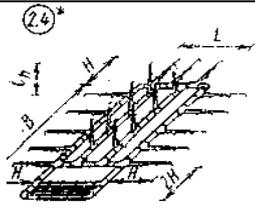
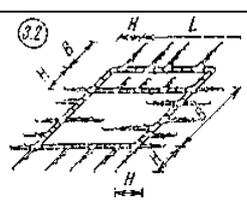
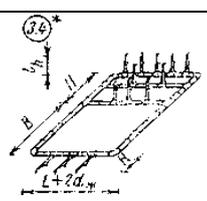
Неразъемные соединения при внутриблочном монтаже применяют главным образом в радиоэлектронной аппаратуре, предназначенной для жестких условий эксплуатации. Применение неразъемных соединений привело к большому разнообразию конструкций блоков.

Конструкция внутриблочного жгутового монтажа определяется особенностью конструкций каркасов и требованиями по обслуживанию и ремонту. Внутриблочные жгуты подразделяются на плоские подвижные, сложные объемные подвижные и объемные с подвижными ответвлениями (рис. 7.3).

При проектировании жгутового монтажа необходимо определить допуски на параметры жгута.

*Допуски на параметры электрожгутов. Допуски на длину проводов.* Длина проводов жгута определяется из условия

$$L_{np} + \Delta_{n_i} \gg L^* + \Delta_{n_j}, \quad (7.1)$$

		<b>Группы электромонтажных жгутов</b>		
<b>Расположение монтажных плоскостей в блоке</b>			Плоские, гибкие для 1-й группы блоков	Плоские, подвижные для 2-й группы блоков
		Перечно-вертикальные		
		Продольно-горизонтальные		
		Продольно-вертикальные		
			Сложные, объемные, подвижные для 3-й группы блоков	Объемные с подвижными от- ветвлениями для 4-й группы блоков
				
		Продольно-горизонтальные		
		Продольно-вертикальные		

*\*В некоторых случаях возможна замена гибкими печатными жгутами*

Рис. 7.3 Разновидности монтажных жгутов

где  $L_{np}$  – длина провода;  $L^*$  – длина канала между двумя монтажными точками;  $\Delta_{ni}$  – нижнее отклонение  $i$ -го размера провода;  $\Delta_{nj}$  – верхнее отклонение  $j$ -го размера канала.

Составим систему уравнений для нахождения замыкающего звена:

$$\begin{aligned} L_{np} - (L^* + Z) &= 0; \\ Z = L_{np} - L^* &= \sum_{i=1}^n l_i - \sum_{i=1}^n l_j, \end{aligned} \quad (7.2)$$

где  $Z$  – длина замыкающего звена, которая равна длине провода, необходимого для 3...5 перепаек, или петля для выема отдельных элементов (например, разъемов, колодок, переключателей и т. п.).

Допуск замыкающего звена  $\delta z$  должен компенсировать допуски составляющих звеньев. На основе формул (7.1) и (7.2) допуски замыкающего размера равны

$$\begin{aligned} Z + \Delta_{HZ} &= \sum_{i=1}^n (l_i + \Delta_{Hi}) - \sum_{j=1}^m (l_j + \Delta_{Bj}); \\ Z + \Delta_{BZ} &= \sum_{i=1}^n (l_i + \Delta_{Hi}) - \sum_{j=1}^m (l_j + \Delta_{Hj}). \end{aligned} \quad (7.3)$$

Вычитая из формул (7.3) формулу (7.2), получаем

$$\Delta_{H_z} = \sum_{i=1}^n \Delta_{Hi} - \sum_{j=1}^m \Delta_{B_j}; \quad (7.4)$$

$$\Delta_{B_z} = \sum_{i=1}^n \Delta_{Hi} - \sum_{j=1}^m \Delta_{H_j}. \quad (7.5)$$

Вычитая (7.5) из (7.4), получаем величину допуска замыкающего звена  $Z$ :

$$\Delta_{B_z} - \Delta_{H_z} = \delta_Z = \sum_{k=1}^m \delta_k, \quad (7.6)$$

где  $\Delta_{B_z}$  и  $\Delta_{H_z}$  – верхнее и нижнее отклонения замыкающего звена.

Если принять, что все конструктивные элементы и узлы каркаса блока изготовлены по близким к друг другу классам точности, то допуск k-го размера канала ( $\delta$ ) равен

$$\delta_k = 0,5 \cdot C \sqrt[3]{l_k},$$

где  $C$  – количество единиц допуска, которое для всех составляющих размеров принимается одинаковым при данном варианте решения;

$0,5 \sqrt[3]{l_k}$  – единица допуска для k-го размера в мм;  $l_i$  и  $l_j$  – номинальные значения i-го размера провода и j-го размера канала.

Составные части выражений (7.3), (7.4), (7.5) и (7.6):

*для канала*

а) допуск на крепление жгута

$$\Delta_{np} = \pm \frac{L * 0,5 \cdot C \sqrt[3]{l_{np}}}{l_{np}}; \quad (7.7)$$

б) допуск на длину блока

$$\Delta_{\beta} = \pm 0,5 \cdot C \sqrt[3]{l_{ш} n_{\beta}}; \quad (7.8)$$

в) допуск на высоту блока

$$\Delta_H = \pm 0,5 \cdot C \sqrt[3]{l_{ш} n_H}; \quad (7.9)$$

г) допуск на ширину блока

$$\Delta_{\alpha} = \pm 0,5 \cdot C \sqrt[3]{l_{ш} n_{\alpha}}; \quad (7.10)$$

д) допуск на подвижные части

$$\Delta_{под} = \pm 0,5 \cdot C \sqrt[3]{l_{под} n_{под}}, \quad (7.11)$$

где  $n_{\beta}$ ,  $n_H$ ,  $n_{\alpha}$ ,  $n_{под}$  – соответственно количество шагов ( $l_{ш}$ ) по длине, высоте и ширине блока и количество подвижных частей;  $l_{ш}$  – шаг координатной сетки;  $l_{под}$  – длина подвижной части жгута;

*для провода*

а) допуски на длину проводов при раскладке (на концы проводов)

$$\Delta_{K_n} = \pm 0,5 \cdot C \sqrt[3]{L'}; \quad (7.12)$$

б) допуски на установку технологических шпилек устройства изготовления жгутов

$$\Delta_{u_n} = \Delta_{np}; \quad (7.13)$$

в) допуски на изготовление и установку пластин устройства

$$\Delta n_\beta = \pm 1,101\Delta_\beta; \Delta n_H = \pm 1,01\Delta_H; \Delta n_\alpha = \pm 1,01\Delta_\alpha; \quad (7.14)$$

г) допуски на подвижные части

$$\Delta n_{\text{под}} = \pm 0,99\Delta_{\text{под}}n_{\text{под}}. \quad (7.15)$$

Если удобно вести расчеты по средним значениям размеров, то среднее значение технологического замыкающего звена  $Z_c$  зависит от средних значений отрезков длины канала  $l_{jc}$ :

$$Z_c = f(l_{jc}). \quad (7.16)$$

Если составляющим размерам канала  $l_{jc}$  дать малые приращения  $\delta_k/2$ , то получит соответствующее приращение и технологический замыкающий размер

$$Z + \delta_Z/2.$$

Тогда (7.16) получит соответствующее выражение, продифференцировав которое в интервале от  $l_{kc}$  до  $l_{kc} + \delta_k/2$  по всем аргументам  $l$  и разложив в ряд Тейлора, отбросив члены высших порядков, получим

$$Z_c + \frac{\delta_Z}{2} = f(l_{1c}, l_{2c}, l_{3c}, \dots, l_{mc},) + \frac{\partial Z}{\partial l_K} \cdot \frac{\delta_1}{2} + \frac{\partial Z}{\partial l_{2c}} \cdot \frac{\delta_2}{2} + \dots + \frac{\partial Z}{\partial l_{mc}} \cdot \frac{\delta_m}{2} + \dots \quad (7.17)$$

Вычитая из (7.17) выражение (7.16), получим

$$\begin{aligned} \frac{\delta_Z}{2} = \Delta_{H_z} &= -\sum_{i=1}^n \frac{\partial z}{\partial l_{i_c}} \cdot \frac{\delta i}{2} + \sum_{j=1}^m \frac{\partial z}{\partial l_{j_c}} \cdot \frac{\delta j}{2}; \\ -\frac{\delta_Z}{2} = \Delta_{B_z} &= -\sum_{i=1}^n \frac{\partial z}{\partial l_{i_c}} \cdot \frac{\delta i}{2} - \sum_{j=1}^m \frac{\partial z}{\partial l_{j_c}} \cdot \frac{\delta j}{2}. \end{aligned} \quad (7.18)$$

*Допуски на диаметр жгута.* Погрешности диаметра жгута обуславливаются следующими причинами:

- 1) неравномерностью расположения и натяжения проводов;
- 2) загибами проводов;
- 3) ответвлениями проводов;
- 4) неравномерностью диаметров по длине провода;
- 5) неравномерностью натяжения нитей при вязке проводов и т.п.

Для определения допусков на диаметр жгута рассмотрим следующие варианты расположения проводов с одинаковыми наружными диаметрами в разрезе жгута:

1. Примем диаметр сечения жгута равным  $2R$  (рис. 7.4, а), в котором вокруг центрального провода правильными рядами расположим провода до полного заполнения круга. Такое сечение жгута можно принять за теоретическую идеализированную модель, площадь сечения которой

$$S_1 = \pi R^2. \quad (7.19)$$

2. Если при том же диаметре вокруг центрального провода плотно расположим такое же количество проводов, то сечение жгута примет форму шестиугольника (рис. 7.4, б), площадь которого равна

$$S_2 = 2,6R^2. \quad (7.20)$$

3. При беспорядочном расположении проводов в жгуте за граничное сечение можно принять описанный вокруг окружности квадрат, длина стороны которого равна диаметру окружности теоретической модели жгута, а площадь

$$S_3 = 4R^2,$$

тогда поле допусков будет равно

$$\delta'' = \pm \frac{S_3 - S_1}{S_3 + S_1} \cdot 100.$$

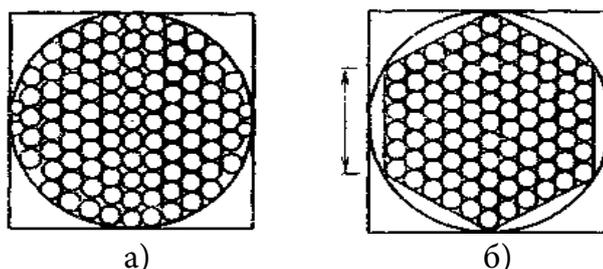


Рис. 7.4. Схема расположения проводов по сечению жгута

## 7.2. Жгутовый монтаж ЭС

Жгутовый монтаж ЭС состоит из следующих характерных этапов:

- 1) подготовки радиодеталей;
- 2) заготовки монтажных проводов, кабелей и жгутов;
- 3) электрического монтажа аппаратуры;
- 4) пайки монтажных соединений;
- 5) 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, ПМВ, 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 стораает.

К механическим приспособлениям, предназначенным для удаления эмалевой изоляции, относится устройство с металлическими щетками, ко-

торые 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 стекловолоконистую.

Для зачистки концов высокочастотных кабелей РК применяют полуавтомат, при помощи ступенчатых переходов удаляют изоляцию с концов кабеля по заданным размерам в зависимости от конструкции кабеля. Разделка концов высокочастотных кабелей показана на рис. 7.5. На передней панели автомата расположены гнезда, за которыми находятся шпиндели с головками, предназначенные для срезания одного из слоев изоляции. Электродвигатель полуавтомата одновременно приводит во вращение все шпиндели.

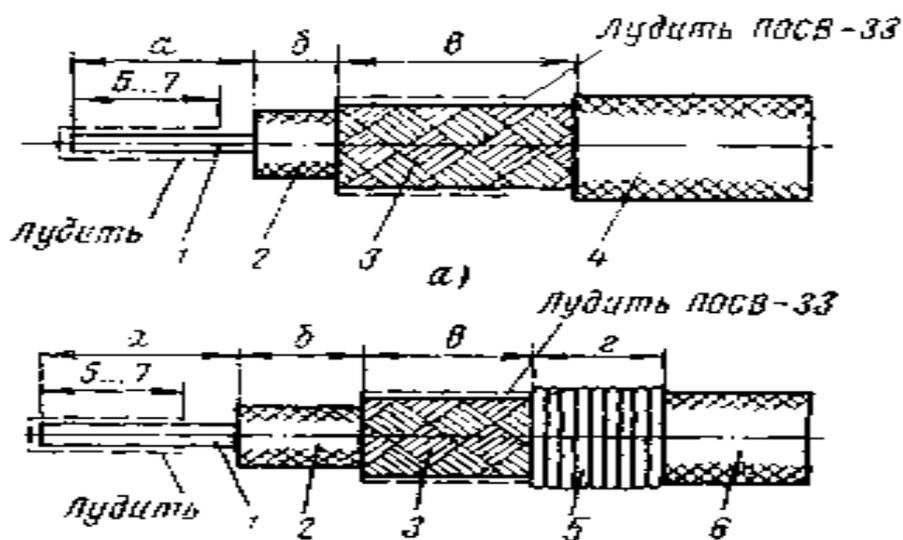


Рис. 7.5. Разделка концов высокочастотных кабелей:

- а – кабелей РК; б – кабелей РК-44 (РК-45); 1 – жила; 2 – изоляция;  
 3 – экранирующая оплетка; 4 – пластиковая изоляция;  
 5 – хлопчатобумажная нитка № 00; 6 – текстильная оплетка

Первое гнездо и соответствующий шпindel с головкой предназначены для удаления хлорвиниловой изоляции, второе – для удаления экранирующей оплетки, третье – для удаления хлопчатобумажной изоляции (способом обжига), четвертое – для обрезки полиэтиленовой изоляции и пятое – для обрезки резиновой изоляции. Таким образом, кабели с хлорвиниловой изоляцией обрабатывают в гнездах 1, 2 и 4, а с хлопчатобумаж-

ной – в гнездах 2, 3 и 5. При обработке кабелей должна быть обеспечена целостность (отсутствие надрезов) токопроводящей жилы, внутренней изоляции и экранирующей оплетки. Размеры а, б, в, г определяются типом разъема и должны отвечать требованиям чертежа.

Окисную пленку на оголенной части токопроводящего слоя зачищают шлифовальной шкуркой. Зачищенную жилу облуживают припоем ПОС-40 на 5...7 мм от конца.

Концы наружной текстильной оплетки кабелей РК-44 и РК-45 закрепляют нитками №00, а после этого покрывают нитроклеем.

Концы изоляции проводов с волокнистой изоляцией для предохранения от разлохмачивания нитками (оклетневка), электроизоляционными трубками, наконечниками из пластмассы или нитролаком.

Оклетневка состоит в наматывании на изоляцию слоя ниток и в соответствующем их закреплении (рис. 7.6). Оклетневку выполняют цветными хлопчатобумажными или шёлковыми нитками, которые затем покрывают клеем БФ-4 или нитролаком. Использование полуавтомата позволяет механизировать этот процесс и резко сократить трудоемкость операции.

Операция оклетневки на полуавтомате осуществляется в следующей последовательности:

1) монтажный провод закрепляется в губки, а нитка набрасывается на захват и закрепляется в зажиме. Эти переходы осуществляются вручную (рис. 7.7, а);

2) предварительной намоткой на провод двух-трех витков в сторону губок нитки прижимают-

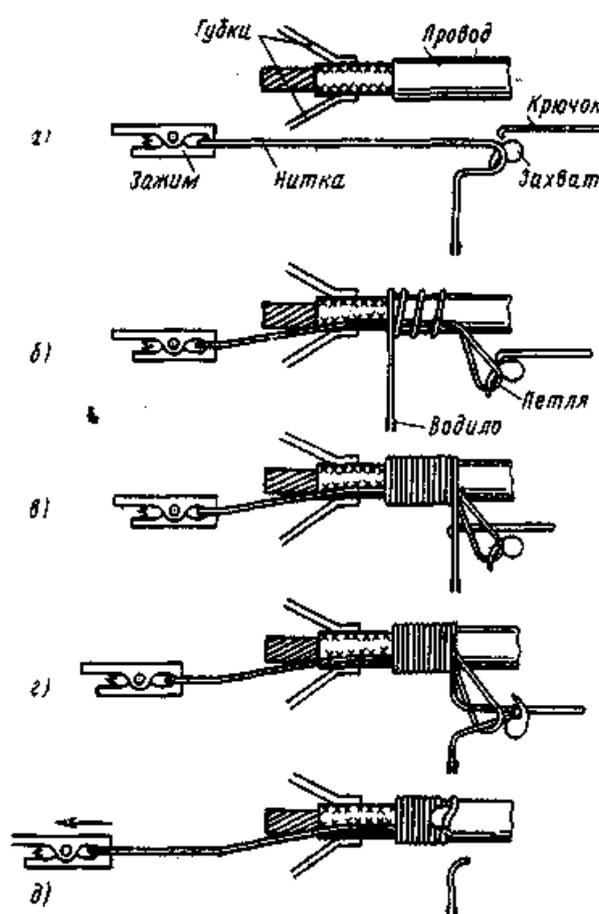


Рис. 7.6. Закрепление изоляции провода ниткой (оклетневка):

- а – закрепление первого витка;
- б – укладка последующих витков;
- в – затягивание витков и отрезание концов ниток;
- г – провод;
- д – хлопчатобумажная нитка № 20

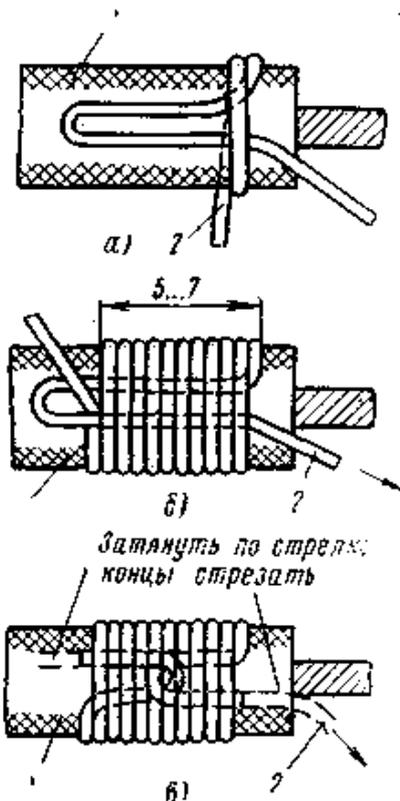


Рис. 7.7. Операции оклетневки

ся к проводу и создается петля (рис. 7.7, б), затем в направлении от губок к петле укладывается в ряд необходимое для закрепления количество витков ниток и проводило останавливается в заданном положении (рис. 7.7, в);

3) с помощью крючка конец ниток протягивается через петлю. Захват, поворачиваясь, сбрасывает петлю, а соприкасаясь с крючком, перерезает конец ниток (рис. 7.7, д);

4) перемещением зажима влево от губок петля протягивается под намотку, закрепляя тем самым нитки на проводе (рис. 7.7, д).

Далее губки разжимаются и провод снимается.

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. 7.8).

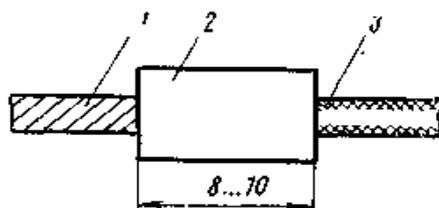


Рис. 7.8. Закрепление изоляции провода отрезком трубки

Заделку нитролаком выполняют на участке провода длиной 8...10 мм (рис. 7.9).



Рис. 7.9. Закрепление изоляции провода нитролаком:

1 – жила; 2 – нитролак; 3 – изоляция

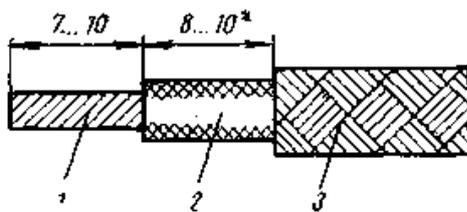


Рис. 7.10. Разделка конца экранированного провода:  
1 – жила; 2 – изоляция; 3 – экранирующая оплетка

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. 7.10 и 7.11). Размеры со звездочкой устанавливают в зависимости от рабочего напряжения провода (табл. 7.1).

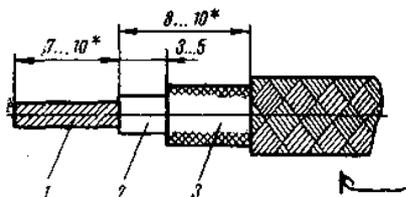


Рис. 7.11. Разделка конца провода БПВЛЭ (БПШЭ, МГВЛЭ, МЦСЛЭ):  
1 – жила; 2 – пластикатовая изоляция; 3 – текстильная оплетка

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.

Таблица 7.1. **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

Образец жгута делают на стадии проектирования прибора.

В серийном производстве жгуты изготавливают следующим образом: монтажные провода, прошедшие зачистку, лужение и заделку концов, укладывают на шаблон согласно таблице соединений, содержащей сведения о марке, сечениях, порядковых номерах и расцветке проводов. Укладку провода начинают с закрепления его на начальной шпильке.

Затем провод прокладывают по схеме жгута, изгибая его на угловых шпильках и закрепляя на конечной шпильке. Начальная и конечная шпильки имеют один и тот же номер. Когда все провода уложены, их обвязывают льняными нитками. Связанный жгут снимают с шаблона и пробником проверяют правильность укладки проводов.

На рис. 7.12 показан жгут, изготовленный на шаблоне: точками обозначены шпильки, порядковые номера проводов даны в кружках, сокращенные обозначения «Кр», «Зл» и т. п. указывают расцветку провода (красный, зеленый), римские цифры указывают номера ветвей жгута.

В тех случаях, когда к механической прочности и влагостойкости жгутов предъявляют повышенные требования, их обвязывают киперной лентой и пропитывают лаком.

Более удобны в работе электрифицированные шаблоны, получившие широкое распространение на радиозаводах; они значительно снижают трудоемкость процесса изготовления жгута и сокращают возможный брак.

В электрифицированном шаблоне концевые шпильки заменены зажимами-кнопками, в которые вмонтированы зеленые сигнальные лампочки. Иногда лампочки расположены рядом с зажимами около цифро-



соединений, сигнализирующая о том, что провод проложен правильно. Одновременно с этим загораются две зеленые лампочки тех кнопок-зажимов, между которыми нужно проложить следующий монтажный провод, и т. д. Если жгут уложен правильно, будут гореть только контрольные красные лампочки таблицы соединений.

Концы проводов в жгутах и междублочных кабелях маркируют, используя изоляцию проводов различного цвета, метки из разноцветных нитроэмалей, наконечники из цветных или нумерованных полихлорвиниловых трубок, съемные бирки, клеевую полихлорвиниловую ленту, на которую нанесены цифры. Бандаж из маркировочной липкой ленты накладывают на провода и жилы кабеля в 1,5...3 оборота.

*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 расширочных 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 облуженные 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 сплошным, 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, лужен-

ных 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 °С 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.

На рис. 7.13 показаны способы механического крепления жил проводов и выводов радиодеталей на контактных лепестках различной конструкции.

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 по-

мечают 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.

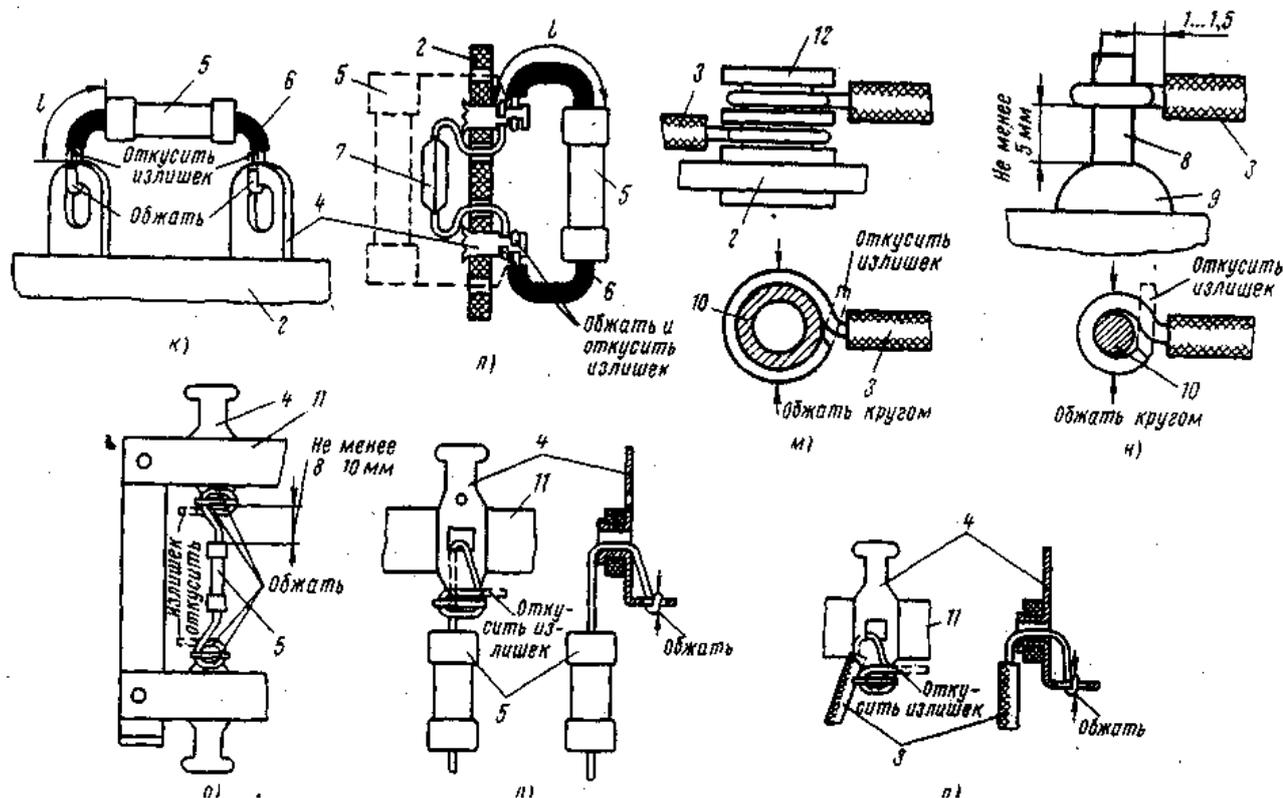


Рис. 7.13. Крепление жил проводов и выводов радиодеталей на контактных лепестках:

*а и б* – продеванием в отверстие контактного лепестка и отгибанием;

*в – л* – продеванием в отверстие контактного лепестка и загибанием вокруг него на пол-оборота; *м – р* – продеванием в отверстие контактного лепестка и загибанием

вокруг него на полный оборот; 1 – контакт; 2 – панель; 3 – провод; 4 – лепесток;

5 – резистор; 6 – изоляционная трубка; 7 – конденсатор; 8 – круглый контакт;

9 – проходной изолятор; 10 – сечение контакта; 11 – планка; 12 – контакт;

1 – не менее 8 – 10 мм и не более 15 мм

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; надписи номиналов и маркировка на этих деталях должны быть хорошо видны и удобны для чтения.

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

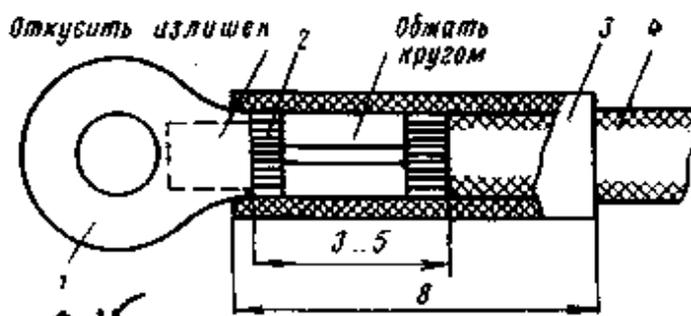


Рис. 7.14. Заделка провода в кабельный наконечник:

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

*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, ко-

торые снижают его прочность, 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 °С 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 °С (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 припои 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 припои 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. 7.15.



Рис. 7.15. Формы сечения трубчатых припоев

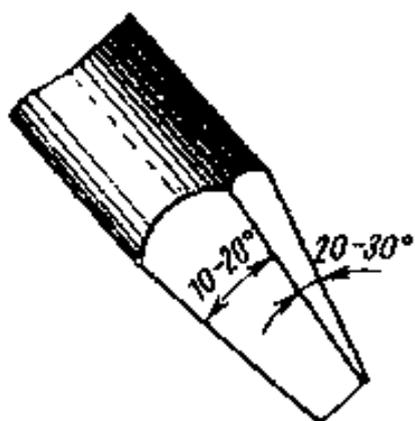


Рис. 7.16. Заостренный конец жала паяльника

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.

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  $20...30^\circ$  и  $10...20^\circ$  (рис. 7.16). Поверхность жала должна быть ровной, без раковин, очищенной от нагара и хорошо облуженной.

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. 7.2.

Таблица 7.2. 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

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

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 МЛТ.

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 полупроводникового 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 (рис. 7.17)

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 индуктируется 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 паек. Пропуск паек 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  $+130^{\circ}\text{C}$ );
- б) низкая механическая прочность паяного соединения, выполненного легкоплавкими припоями;
- в) высокая стоимость припоев и флюсов;
- г) трудность механизации и автоматизации процесса.

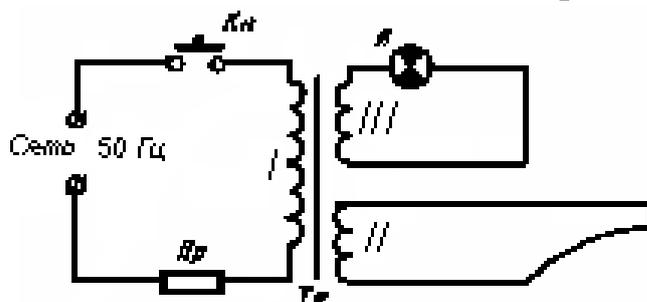


Рис. 7.17. Схема импульсного паяльника

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. 7.18, а). Проводник вставляют через боковое отверстие лепестка так, чтобы конец выступал на 5... 6 мм. Затем полутрубочку обжимают в трубочку (рис. 7.18, б) и сваривают (рис. 7.18, в).

Для отвода тепла и предупреждения перегрева монтажных соединений при электросварке применяют термоэкран. Процесс электросварки монтажных соединений может быть механизирован и даже автоматизирован.

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:

1) печатание электрического монтажа;

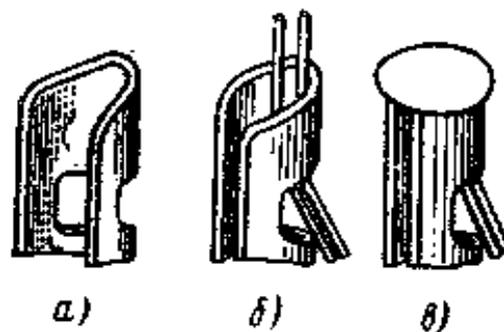


Рис. 7.18. Последовательность выполнения сварного соединения

- 2) подготовка радиоэлементов к монтажу;
- 3) установка радиоэлементов на печатной плате;
- 4) пайка;
- 5) 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. 7.19).

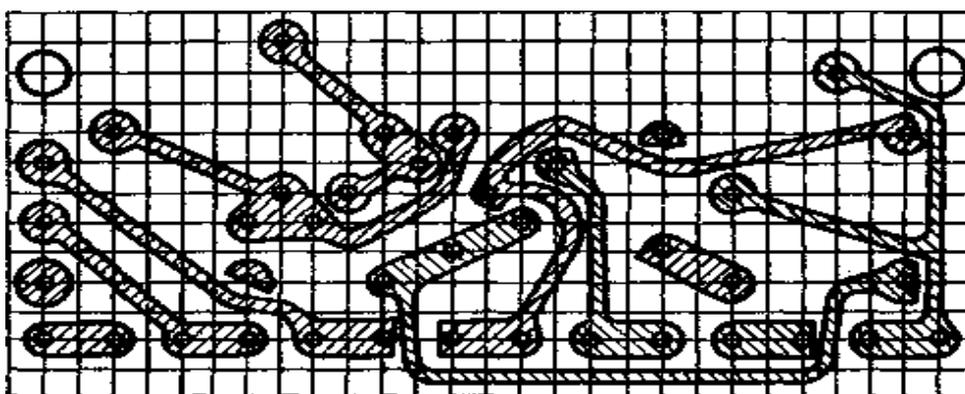


Рис. 7.19. Печатная плата

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 электро-технического гетинакса, фольгированного гетинакса, фольгированного стеклотекстолита и др. (табл. 7.3).

Таблица 7.3. **Материалы плат**

Методы изготовления печатных плат	Марки материалов	ГОСТ или ТУ	Рекомендуемые толщины материала, 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

Для предохранения печатного монтажа от воздействия влаги, а также с целью электроизоляции схем применяют различные лаки и компаунды.

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:

- а) фотоэлектрохимический;
- б) офсетно-электрохимический;
- в) сеточно-электрохимический;
- г) прессоэлектрохимический.

Г р у п п а – получение печатных проводников травлением фольгированного изоляционного материала. Для этого используют следующие методы:

- а) фотохимический;
- б) офсетно-химический;
- в) 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:

- а) фотоперенос;
- б) офсетоперенос;
- в) сеточный перенос.

### **7.3. 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 вы-

водов – 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 быстродействующей, 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.

Имеется 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 схемной 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 матрица специально сформованных прямоугольных проводников. Этот соединитель предназначен для кон-

тактирования с многокристалльными 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 многокристалльными 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 линий 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 упаковки 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°С 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 улучшить 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 и малой массой ВОЛС (табл. 7.4); большей широкополосностью; высоким качеством передачи, связанным с отсутствием взаимных помех между каналами; отсутствием излучения в окружающее пространство, высокой помехозащищенностью и помехоустойчивостью; скрытностью передачи; отсутствием коротких замыканий, искрений и угрозы возгорания; более широким температурным диапазоном работы.

**Таблица 7.4. Характеристики оптического и медного кабелей**

Тип кабеля	Полоса пропускания	Диаметр, мм	Масса одного метра, г
Оптический	10 МГц	3,2	45,3
Медный	1 кГц	1,6	300.0

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 оп-

тических волокон, с полным диаметром 70...300 мкм. На рис. 7.20 приведены несколько примеров сечений оптических кабелей.

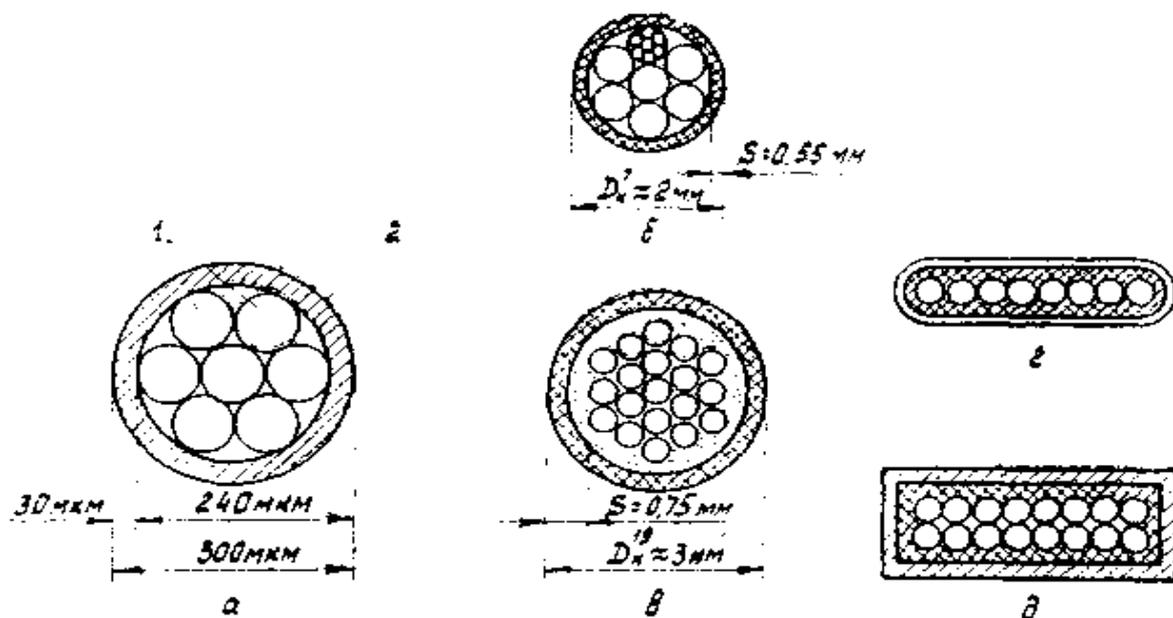


Рис. 7.20. Сечение оптических кабелей:

а – световолоконный 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 металлорукаве

На рис. 7.21 показан оптический волновод.

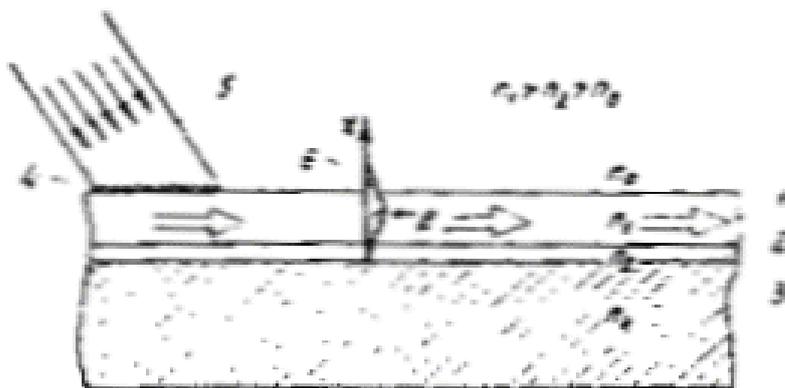


Рис. 7.21. Оптический волновод:

1- прозрачный волноводный слой; 2 – слой  $\text{SiO}_2$ ; 3 – кремневая подложка; 4 – элемент ввода световой волны в волновод (дифракционная решетка); 5 – падающая световая волна; 6 – распределение амплитуды поля в волне, распространяющейся в волноводе ( $n$  – показатель преломления оптической среды)

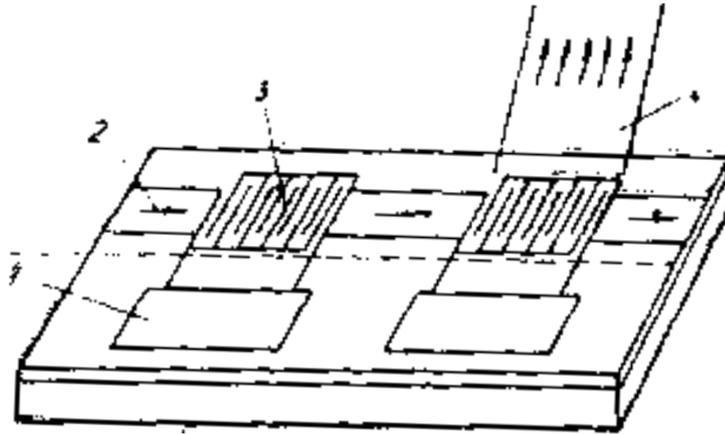


Рис.7.22. Фрагмент интегральной микросхемы с оптическими каналами связи:  
 1 – электронная часть ИМС; 2 – электрооптический волновод; 3 – модулятор;  
 4 – оптический выходной канал

Модулятор преобразует электрический сигнал ИМС электронной части ЭС в световой сигнал. Управляющие напряжения модуляторов находятся в диапазоне 2...15 В и согласуются с напряжениями, используемыми для работы ИМС.

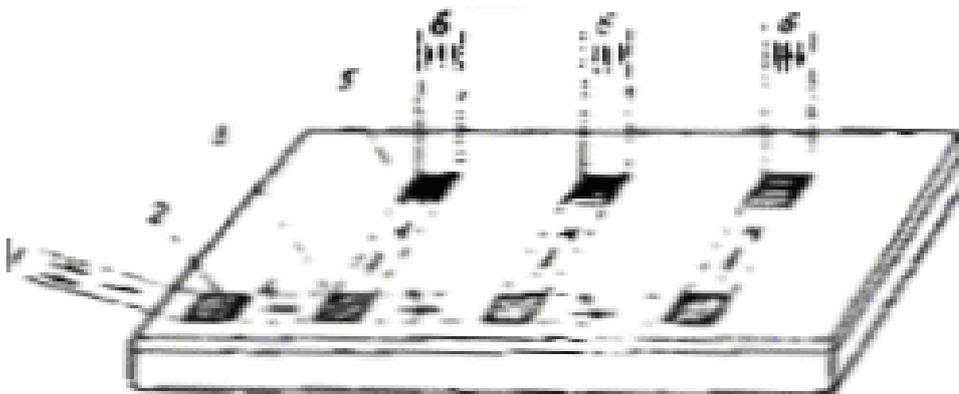


Рис. 7.23. Интегрально-оптическая разводка:  
 1 – входной световой луч; 2 – вводная дифракционная решетка;  
 3 – планарный ответвитель; 4 – световые лучи в волноводном слое;  
 5 – экспланарный ответвитель; 6 – выходные световые лучи

Перевод светового луча из одной оптической среды в другую осуществляется экспланарными ответвителями (дифракционными решетками), а поворот луча в пределах одной и той же оптической среды – планарными ответвителями (рис. 7.22; 7.23). Угол вывода светового луча из волновода регулируется периодом решетки и может достигать 90°. Потери в

экспланарном ответвителе с наименьшими размерами около 100 мкм не превышают 1 дБ. Ответвители обладают обратимостью действия, т.е. осуществляют и ввод луча в волновод.

Интегральные микросхемы с оптическими каналами связи (ИМСОКС) представляют собой конструкцию, в которой совмещены элементы обычной кремневой ИМС с указанными выше элементами интегральной оптики (рис. 7.24).

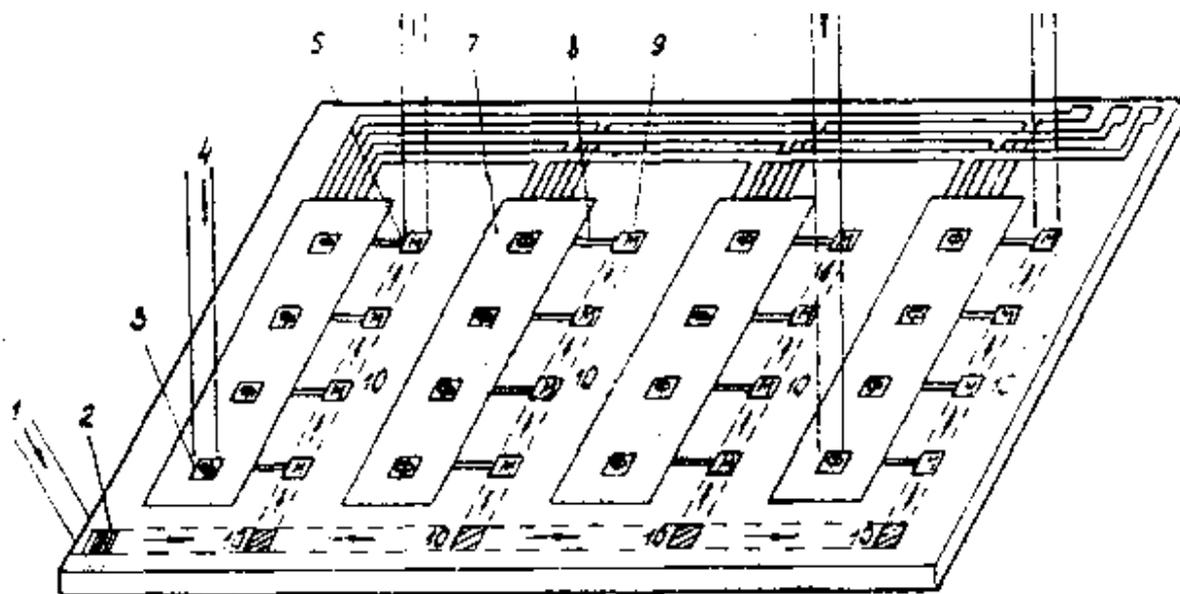


Рис. 7.24. Интегральная микросхема с оптическими каналами связи:  
 1 - луч светового питания; 2 - волновод; 3 - фотоприёмное окно;  
 4 - входной световой канал; 5 - экспланарный ответвитель;  
 6 - выходной световой канал; 7 - электронная часть схемы;  
 8 - электрические выходы; 9 - модулятор; 10 - световая разводка

Волноводно-оптическая плата выполняет функции одного слоя коммутационной платы. Материал платы должен быть прозрачным для световых лучей, выходящих из экспланарных ответвителей.

Конструкция блока ЭС на ИМСОКС изображена на рис. 7.25. Из пакета волоконно-оптических плат набираются схемные платы функциональных ячеек (ФЯ). 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 ФЯ, могут быть осуществлены либо непосредственно через волноводно-оптическую плату, либо через блочную оптическую плату.

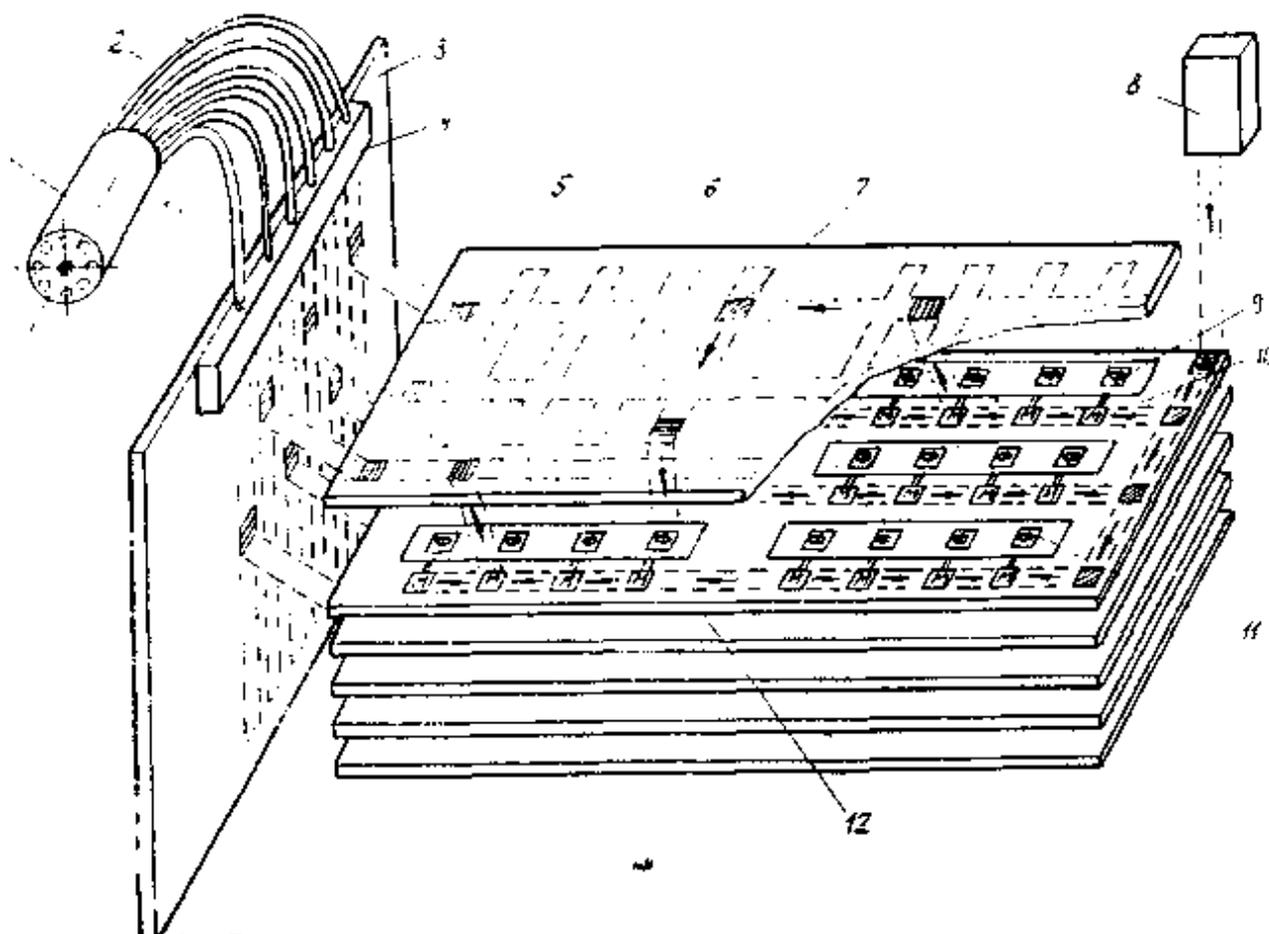


Рис. 7.25. Конструкция блока ЭС на ИМСОКС:

1 – соединитель; 2 – многоканальный волоконно-оптический кабель;  
 3 – блочно-оптическая плата; 4 – соединитель на плате; 5 – экспланарный ответвитель;  
 6 – волноводно-оптическая плата; 7 – планарный ответвитель; 8 – лазерный источник  
 питания; 9 – фотоприёмное окно; 10 – модулятор; 11 – зона ИМС; 12 – схемная плата

Оптический кабель с источником и приемником излучения образуют волоконно-оптическую линию связи (рис. 7.26).

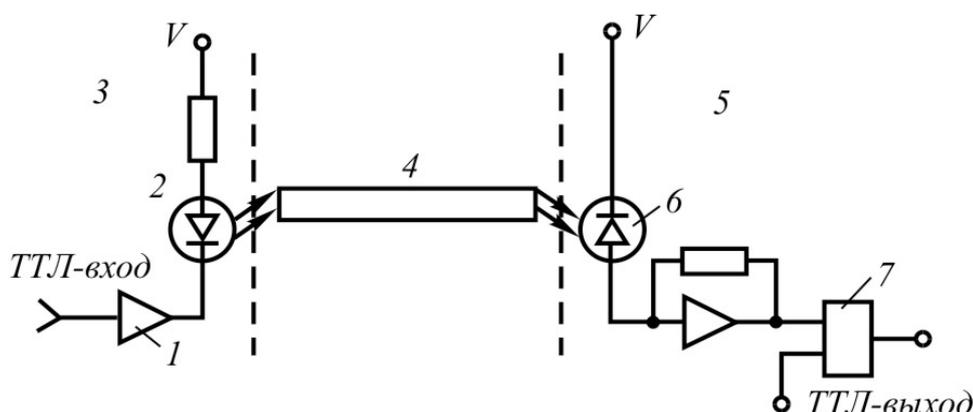


Рис. 7.26. Схема волоконно-оптической линии связи:  
 1 – возбуждатель; 2 – светодиод; 3 – передатчик; 4 – оптический кабель;  
 5 – приемник; 6 – фотодиод; 7 – усилитель

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 волноводные 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.

---

---

## БИБЛИОГРАФИЯ

---

---

1. Зеленский, А.В. Моделирование процессов при проектировании ЭС [Текст]: учеб. пособие / А.В. Зеленский, Н.В. Ляченков. – М.: Машиностроение, 2000. – 252 с.
2. Баканов, Г.Ф. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств [Текст]: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / 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 [Текст]: учеб. пособие / А.В. Зеленский, В.А. Зеленский, Г.Ф. Краснощекова [и др.] – Самара: «Издательство СНЦ РАН», 2007. – 243 с.
4. Расчет системы амортизации радиоэлектронной аппаратуры [Текст]: метод. указания / сост. Г.Ф. Краснощекова. – Самара: СГАУ, 2008. – 13 с.
5. 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. (НТА – 5 экз.; КХ – 34 экз.)
6. Разработка конструкции радиоэлектронной аппаратуры [Текст]: метод. указания к курсовому проектированию / сост. Г.Ф. Краснощекова. – Самара: СГАУ, 2008. – 18 с.
7. Разработка конструкторской документации [Текст]: метод. указания к лабораторным и практическим занятиям / сост.: А.В. Зеленский, Г.Ф. Краснощекова. – Самара: СГАУ, 2008 – 28 с. (№ 21/98-08).
8. Анализ конструкций ЭС [Текст]: метод. указания к практическим занятиям / сост.: Г.Ф. Краснощекова, В.А. Зеленский. – Самара: СГАУ, 2007.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение.....</b>	<b>3</b>
<b>1. Конструктивные уровни электронных средств .....</b>	<b>12</b>
1.1 Иерархический принцип построения ЭС .....	14
1.2 Классификация ЭС .....	17
1.3 Методология проектирования.....	18
1.4. Принципы построения размерно-параметрических рядов типовых конструкций .....	20
1.5. Типовые конструкции ЭС.....	30
1.6. Универсальные типовые конструкции ЭС .....	34
1.7. Конструктивно-технологические особенности современных ЭС.....	37
1.8. Художественно-конструкторская оценка ЭС .....	47
<b>2. Методологическая база проектирования ЭС .....</b>	<b>49</b>
2.1. Системный подход к проектным исследованиям ЭС.....	49
2.2. Основы системного анализа .....	55
2.3. Вопросы проектирования конструкций и технологических процессов .....	63
2.4. Принципы построения расчетных моделей и исследования параметрической чувствительности .....	72
<b>3. Несущие конструкции ЭС и их эволюция.....</b>	<b>87</b>
3.1. Основные требования к несущим конструкциям и механизмам ЭС.....	87
3.2. Конструкционные материалы несущих конструкций и механизмов ЭС .....	91
3.3. Методы проектирования механизмов.....	98
<b>4. Внешние воздействия на ЭС .....</b>	<b>105</b>
4.1. Субъективные и объективные факторы, их влияние на работоспособность ЭС .....	105
4.2 Влияние температуры на работоспособность радиодеталей и радиокомпонентов.....	107
4.3. Влияние атмосферного давления на работоспособность ЭС .....	114
4.4. Влияние ядерной, космической и солнечной радиации на работоспособность радиодеталей и радиокомпонентов .....	116
4.5. Влияние влаги на работоспособность ЭС .....	119

4.6. Влияние механических воздействий на работоспособность ЭС.....	123
<b>5. Модели ЭС в задачах проектирования конструкций.....</b>	<b>126</b>
5.1. Модели процессов и устройств в ЭС .....	126
5.2. Моделирование процессов на основе аналогии .....	128
5.3. Интерполяционные математические модели .....	133
5.4. Разработка модели – ключевой этап инженерного проектирования.....	143
5.5. Основы моделирования конструкций и технологических процессов производства ЭС.....	145
5.6. Математическое моделирование физических процессов ЭС.....	148
5.7.. Моделирование размерных цепей .....	151
<b>6. Обеспечение тепловых и механических режимов ЭС .....</b>	<b>158</b>
6.1. Расчет тепловых режимов ЭС.....	158
6.2. Расчёт системы амортизации ЭС.....	168
6.3. Система амортизации с одной степенью свободы.....	169
6.4. Защита ЭС от воздействия влаги.....	173
<b>7. Монтаж компонентов ЭС.....</b>	<b>182</b>
7.1. Внутриблочный электрический монтаж.....	182
7.2. Жгутовый монтаж ЭС.....	190
7.3. Перспективы развития электрических соединений .....	210
<b>Библиография .....</b>	<b>225</b>

Учебное издание

*Зеленский Анатолий Васильевич  
Краснощекова Галина Федоровна*

## **ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Учебник

Редактор Т. К. Кретьнина  
Доверстка Л. Р. Дмитриенко

Подписано в печать 23.10.2014. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 14,25.

Тираж 100 экз. Заказ . Арт. 4/2014.

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

---

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