

КОНСТРУИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Под редакцией А.С. НАЗАРОВА

*Рекомендовано Государственным Комитетом
Российской Федерации по высшему образованию
в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений, обучающихся
по направлению «Авиа- и ракетостроение»
по специальности
«Проектирование и технология
радиоэлектронных средств»*

Москва
Издательство МАИ
1996

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время в нашей стране происходит коренная перестройка высшего образования: формируются новые специальности, разрабатываются новые учебные планы и квалификационные характеристики специалистов, обсуждается концепция многоступенчатой подготовки бакалавров и магистров.

Поскольку в типовых планах по специальности «Конструирование и производство радиоэлектронных средств» появился один общий курс «Конструирование РЭС» взамен нескольких конструкторских дисциплин (таких как «Механические воздействия и защита РЭС», «Теплообмен РЭС» и др.), это потребовало отдельного учебного плана и учебного пособия, объединившего в себе предметы этих дисциплин. Такой учебник был написан П.П. Геллем и Н.К. Ивановым-Есиповичем для студентов, обучающихся по типовому плану. Однако в ряде вузов, в которых преподавание ведется по индивидуальным планам (например, в МАИ), такой курс, читавшийся в течение 20 лет, имеет свою авиационно-космическую направленность. Поэтому написание данного учебного пособия является завершением и обобщением всего того полезного и дельного, чему учили студентов конструкторского профиля в ряде авиационных вузов.

В книге нашли отражение многие вопросы новой техники, научно-технического прогресса в конструировании РЭС и систематизации инженерных методов расчетов. Весь процесс конструирования рассматривается на базе системного подхода и в органической взаимосвязи как с системе- и схмотехникой, так и с технологией изготовления и эксплуатацией РЭС. Введение, гл. 1 и 3, разд. 8.1, 9.1 написаны А.С. Назаровым, гл. 2, 7, 10, разд. 6.1—6.4 — А.Н. Чекмаревым, гл. 4, 5, разд. 9.2. — В.Ф. Борисовым, разд. 6.5, 8.2 — 8.5, 9.3 — 9.5 — О.П. Лавреневым.

Авторы выражают благодарность профессору Б.В. Петрову и канд. техн. наук Ю.Н. Корниенко за внимательный просмотр рукописи и ценные замечания, способствующие улучшению книги.

ВВЕДЕНИЕ

В.1. Терминология и классификация РЭС

Предметом рассмотрения данного учебного пособия является конструирование радиоэлектронных средств (РЭС). Несмотря на долгий путь, пройденный отечественными конструированием и радиоаппаратостроением, определение как самого предмета, так и его составляющих и производных от него все еще вызывает различные мнения. Поэтому постараемся обобщить разные формулировки, не затрагивая вопросы приоритета и общности понятий, так как без основных терминов невозможно дальнейшее рассмотрение материала даже в пределах одной книги.

Конструкция — состав и взаимное расположение частей какого-нибудь строения, сооружения, механизма, а также само строение, сооружение, машина с таким устройством [1].

Конструировать — создавать конструкцию чего-нибудь, строить [1].

Исходя из этих общих представлений можно ввести* термины, относящиеся к РЭС, предварительно дав определение самим РЭС.

Радиоэлектронные средства — технические средства, основанные на принципах радиоэлектроники и осуществляющие функции преобразования электрических сигналов, несущих информацию, с использованием электромагнитной энергии в пространстве и электронных линиях связи.

Конструкция РЭС — пространственно организованная совокупность компонентов (изделий электронной техники, несущих оснований и материалов), между которыми существуют электрические, оптические, механические, тепловые, магнитные, электромагнитные и другие связи, обеспечивающие заданные преобразования сигналов при наличии взаимных воздействий и воздействий внешней среды.

Конструирование РЭС — творчество, процесс создания новых конструкций радиоэлектронных средств, конечным результатом которого является комплект конструкторских документов для промышленного изготовления изделия.

Поскольку современный этап конструирования РЭС связан с широким внедрением микроэлектроники, появлением новых качественных характеристик микроэлектронной аппаратуры (МЭА) и ее субъектов, появились новые термины, которые используются для описания этих новых конструкций.

Микросборка — микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию и состоящее из элементов, компонентов и (или) интегральных схем (ИС) и других электрорадиоэлементов (ЭРЭ) в различных сочетаниях, разрабатываемое и изготовляемое разработчиками конкретных РЭС для улучшения показателей миниатюризации [2]. Чаще всего микросборки выполняют в виде больших гибридных интегральных схем (БГИС). Они могут быть корпусированными и бескорпусными.

Элемент МСБ — неделимая часть микросборки, которую нельзя специфицировать и поставлять как отдельное изделие. Элементами МСБ являются пленочные резисторы, катушки и конденсаторы, выполненные по той или иной технологии на подложке БГИС.

Компонент МСБ — часть микросборки, которая специфицируется и может поставляться как отдельное изделие. Компонентами МСБ являются бескорпусные транзисторы, диоды, миниатюрные без проволочных выводов конденсаторы, тороидальные катушки индуктивности.

В процессе развития конструирования РЭС сменилось четыре поколения конструкций (разд. В 2), для каждого из которых была характерна своя особая, с общей спецификой конструкция или конструктив.

Конструктив РЭС — типовая разновидность конструкции того или иного уровня сложности аппаратуры, определяемая характерными элементной базой и способом компоновки. Примерами конструктивов разного уровня могут быть бескорпусная МСБ, функциональная ячейка III поколения, блок МЭА IV поколения.

Перейдем к классификации РЭС, которая по отдельным признакам, например по назначению, объекту и условиям эксплуатации, определена давно и достаточно строго, а по функционально-конструктивным признакам в различных источниках дается по-разному. Можно привести много примеров, где одним и тем же термином обозначаются совершенно разные по своим функциям и конструктивной сложности изделия: полупроводниковый прибор (транзистор) и измерительный прибор (вольтметр ламповый); импульсное устройство (триггер) — радиоприемное устройство (транзисторный приемник); блок конденсаторов переменной емкости — блок индикатора кругового обзора и т.д. Поэтому остановимся на классификации РЭС по следующим признакам:

по функциональной сложности, т.е. по числу и рангу функций, выполняемых изделием;

по конструктивной сложности, определяемой числом элементов конструкции и числом соединений между ними, выбранной элементной базой и способом компоновки;

по назначению;

по объекту установки;

по виду сигнала и диапазону частот.

По функциональной сложности деление РЭС может быть представлено в виде следующей цепочки (сверху вниз): радиотехническая система — комплекс радиоэлектронных устройств — радиоэлектронное устройство (РЭУ) — блок — субблок — функциональный узел.

Радиотехническая система представляет собой «совокупность сигналов в пространстве, операторов и радиоэлектронной аппаратуры, размещенных на объектах в определенных точках на поверхности или в пространстве, действующих в условиях помех и внешних возмущений»*; например, такой системой является система посадки самолета.

Комплекс радиоэлектронных устройств — совокупность РЭУ, объединенных, как правило, на одном объекте и являющихся законченной частью системы; например, наземный и бортовой комплексы радиосвязи самолета с землей.

Радиоэлектронное устройство — часть комплекса, решающая конкретную основную целевую функцию, функционально и конструктивно законченная и, главное, автономно эксплуатационная; например, телевизионный радиоприемник с антенной.

Блок — часть РЭУ, выполняющая частную целевую функцию, функционально законченная, но автономно неэксплуатационная; например, блок питания. Блок может быть конструктивно законченным, но может и входить как часть конструкции в устройство.

Субблок — часть блока, выполняющая функцию его отдельного тракта, например тракта усилителя промежуточной частоты.

Функциональный узел — единица функциональной сложности РЭС на уровне отдельного каскада электрической схемы; например, узел смесителя.

По конструктивной сложности, определяемой выражением

$$C = k_1(k_2N + k_3M),$$

* Пестряков В.Б. Конструирование РЭА. — М.: Сов. радио, 1969.

где k_1 — масштабный (нормирующий) коэффициент относительно конструкции прототипа; k_2, k_3 — весовые коэффициенты, учитывающие вероятности отказов элементов и соединений; N, M — число схемных элементов и соединений между ними соответственно, радиоэлектронные средства подразделяют на много- и моноблочные конструкции, функциональные ячейки (ФЯ), микросборки, микросхемы и функциональные компоненты.

Многоблочные конструкции выполняют в виде шкафов, стоек, пультов; моноблочные — в виде контейнеров или отдельных корпусированных приборов; функциональные ячейки — в виде сборок ЭРЭ и корпусированных ИС на печатных платах или сборок из МСБ на металлических рамках. Микросхемы и функциональные компоненты (оптроны, интегральные пьезофильтры, фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ), джозефсоновские приборы, приборы с зарядовой связью (ПЗС) и на цилиндрических магнитных доменах (ЦМД) и др.) часто корпусируются и представляют собой изделия электронной техники. В совокупности они образуют элементную базу современных РЭС.

По назначению РЭС делят на средства: радиовещания и телевидения, радиоуправления и радиотелеметрии, радиолокации и радионавигации, радиоастрономии, радиоизмерительные, обработки данных и информации, записи и воспроизведения, медицинские и промышленные.

По объекту установки они классифицируются по трем основным категориям, в каждой из которых существуют группы, а именно: бортовые (самолетные, космические, ракетные), наземные (возимые, носимые, переносные, бытовые, стационарные) и морские (судовые, буйковые).

По виду сигнала и диапазону частот РЭС могут быть аналоговыми, цифровыми и СВЧ. В настоящее время РЭС, как правило, являются комбинированными, т.е. включающими в себя как аналоговые СВЧ-блоки, так и блоки цифровой обработки информации.

В заключение отметим, что РЭС могут иметь различные конструктивные формы в зависимости от их функциональной сложности и степени интеграции используемых ИС. Например, при высокой степени интеграции и соответствующей функциональной сложности (свыше 1000 элементов) устройство может быть заключено в один объем, имеющий форму моноблока, ячейки, микросборки и даже одного кристалла. При недостаточной степени интеграции формообразование радиоустройств идет по пути создания многоблочной конструкции. Это положение отражает табл. В.1, в которой показана зависимость формообразования конструкций РЭС от степени интеграции микросхемы.

Таблица В.1

Ранг функциональной сложности	Форма конструктивного исполнения при количестве элементов ВИС			
	не более 100	100...1000	1000...10000	> 10000
Устройство	Многоблочная конструкция	Моноблок или ФЯ	МСБ	СБИС**
Блок	Моноблок	МСБ	БИС	—
Субблок	Функциональная ячейка	БИС*	—	—
Функциональный узел	ИС, гибридная ИС, функциональный компонент	~	~	~

* БИС — большая интегральная схема,

** СБИС — сверхбольшая интегральная схема.

В приведенной таблице можно указать конкретные виды конструктивов: многоблочная конструкция — ЭВМ ЕС 1045, моноблок — микрокалькулятор на печатной плате «Электроника МК36», МСБ — микрокалькулятор на стеклянной подложке с кристаллами держателями серии К145 «Электроника БЗ-04», СБИС — однокристалльная ЭВМ.

В.2. Тенденции развития конструкций РЭС

Развитие конструкций РЭС, как известно, прошло уже четыре этапа. Смена каждого поколения обуславливалась сменой элементной базы, в основном активных элементов РЭУ, и, как следствие, сменой метода и правил компоновки и монтажа.

Первое поколение РЭС базировалось на ламповой технике и блочном методе компоновки и монтажа. Появление отечественных ламп относится к 1919 г. (Нижегородская радиолaborатория под руководством М.А. Бонч-Бруевича), а начало радиовещания в СССР — к 1924 г.

Первые радиолокационные станции (РЛС) появились в 1933 г.

Таким образом, можно говорить, что промышленное серийное производство РЭС началось примерно с 1930 г., а весь период развития конструкций РЭС занимает около 60 лет. Сложность РЭС увеличивается сейчас примерно в 10 раз за каждые пять лет.

Ламповая техника также непрерывно видоизменялась: лампы стеклянной и металлической серий, пальчиковые лампы, лампы серий «дробь» и «желудь». Блочный метод компоновки заключался в выполнении конструкций крупных частей схемы в виде моноблоков, чаще

всего без кожухов, компокуемых в стойках и фермах и коммутируемых как внутри себя, так и между собой проволочно-жгутовым монтажом (рис. В.1). Основными недостатками конструкций этого поколения были малая унификация, неразвитая эксплуатационная взаимозаменяемость и, как следствие, низкая надежность. Однако при невысоком уровне сложности РЭС эти недостатки были не ^{очень} заметны. С усложнением РЭС появились требования крупносерийного производства, а именно: необходимость расчленения всей конструкции на более мелкие части и введения унификации этих частей. Это позволило упростить сборочно-монтажные и регулировочные работы, уменьшить трудоемкость и стоимость, ввести поточный метод производства и повысить надежность. Такими первыми унифицированными конструкциями были унифицированные функциональные узлы (УФУ) «Элемент-1» на печатном монтаже и лампах типа «дробь» (рис. В.2). Как видим, произошли изменения в методах компоновки (от блочного к функционально-узловому) и монтажа (от проволочно-жгутового к печатному). Сами же лампы подверглись сильной миниатюризации. Все говорило о начале перехода к новому виду поколения.

Так и произошло: в 1954 г. появилось II поколение конструкций РЭС

— промышленная транзисторная техника (изобретение транзистора относится к 1948 г.). Миниатюрные лампы были заменены на транзисторы в корпусах ТО-5, а УФУ «Элемент-1» — на УФУ «Элемент-2» (рис.В.3). Функционально-узловой метод стал доминировать во многих конструкциях РЭС, в особенности с появлением и развитием средств вычислительной техники. Ламповая техника применялась в мощных радиопередающих устройствах на магнетронах, лампах бегущей и обратной волны (ЛБВ и ЛОВ), а также еще многие годы обеспечивала промышленное производство телевизоров, где смена поколений в массовых тиражах не могла произойти в короткие сроки по техническим и организационным причинам.

В период транзисторной техники возникло новое направление в конструировании РЭС — миниатюризация аппаратуры. Уменьшились размеры и массы пассивных ЭРЭ, транзисторов и трансформаторов, катушек индуктивностей и даже электронно-лучевых трубок. Появились новые конструкции функциональных узлов: плоские и объемные модули (рис. В.4), плоские и этажерочные микромодули (рис. В. 5), отличающиеся оригинальностью конструкций и монтажа и увеличением плотности упаковки элементов в объеме с $0,1 \text{ эл/см}^3$ до $1,5...2 \text{ эл/см}^3$. Однако сохранение за дискретными ЭРЭ главной роли основного конструктивного элемента с частотой отказов $\lambda = 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ не смогло существенно повлиять на надежность РЭС, и при все более увеличивающейся их сложности ве-

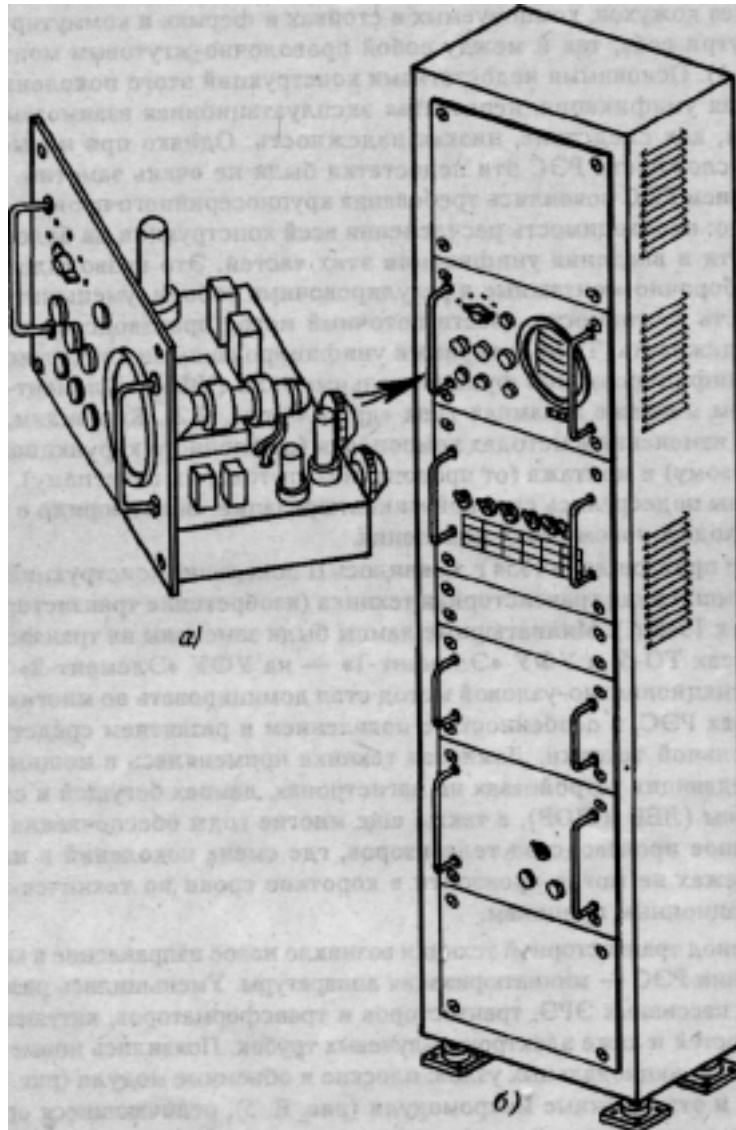


Рис. В.І. Многоблочная конструкция РЭС I поколения;
a — моноблок; *б* — стойка

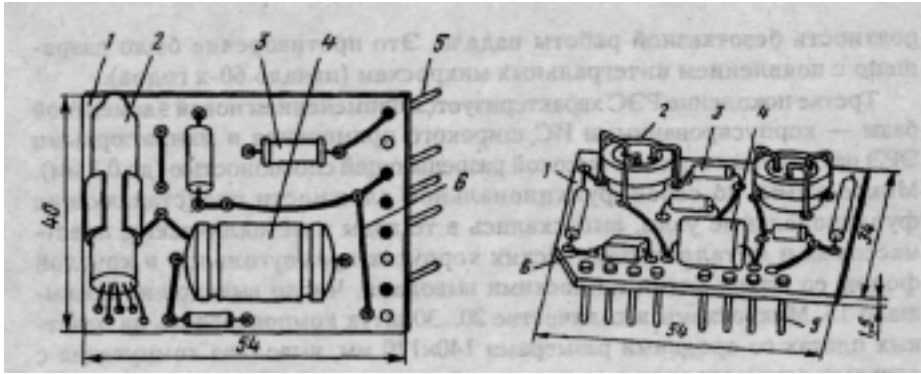


Рис. В.2. Конструкция унифицированного функционального узла «Элемент-1»:

- 1 — печатная плата;
- 2 — лампа типа «дробь»;
- 3 — резистор; 4 — конденсатор;
- 5 — проволочный вывод;
- 6 — печатный проводник

Рис. В.3. Конструкция унифицированного функционального узла «Элемент-2»:

- 1 — печатная плата; 2 — транзистор;
- 3 — резистор; 4 — конденсатор;
- 5 — проволочный вывод;
- 6 — печатный проводник

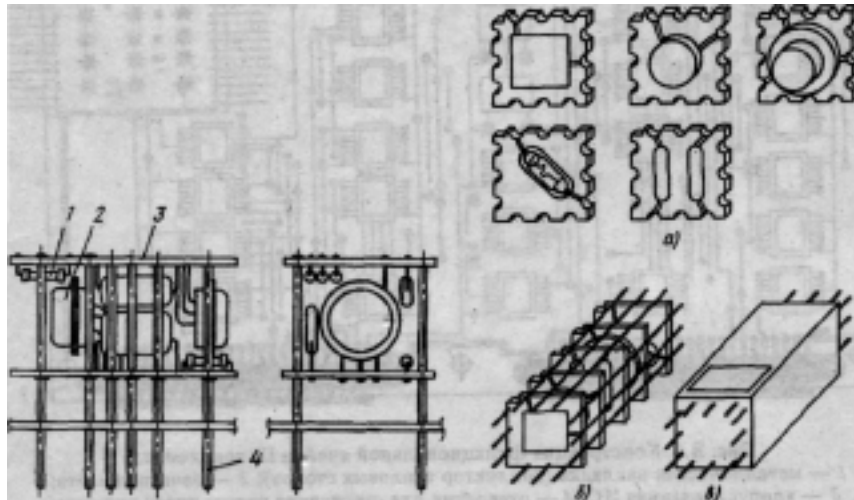


Рис. В.4. Конструкция объемного модуля:

- 1 — резистор; 2 — транзистор;
- 3 — печатная плата;
- 4 — проволочный вывод

Рис. В.5. Конструкция этажерного микромодуля:

- а — микроэлементы;
- б — микромодуль после пайки;
- в — микромодуль после заливки

роятность безотказной работы падала. Это противоречие было разрешено с появлением интегральных микросхем (начало 60-х годов).

Третье поколение РЭС характеризуется применением новой элементной базы — корпусированными ИС широкого применения и миниатюрными ЭРЭ на печатных платах с высокой разрешающей способностью (до 0,3 мм). Микросхемы, по своей функциональной сложности представляющие функциональные узлы, выпускались в те годы в металлических, пластмассовых и металлокерамических корпусах прямоугольной и круглой формы со штырьевыми и плоскими выводами. Число выводов не превышало 15. Микросхемы в количестве 20...30 штук компоновались на печатных платах со средними размерами 140x170 мм, выводная коммутация с которых осуществлялась стандартными разъемами. Такая конструкция, наиболее характерная для цифровых устройств, получила название вначале субблока, а позднее — функциональной ячейки (рис. В.6).

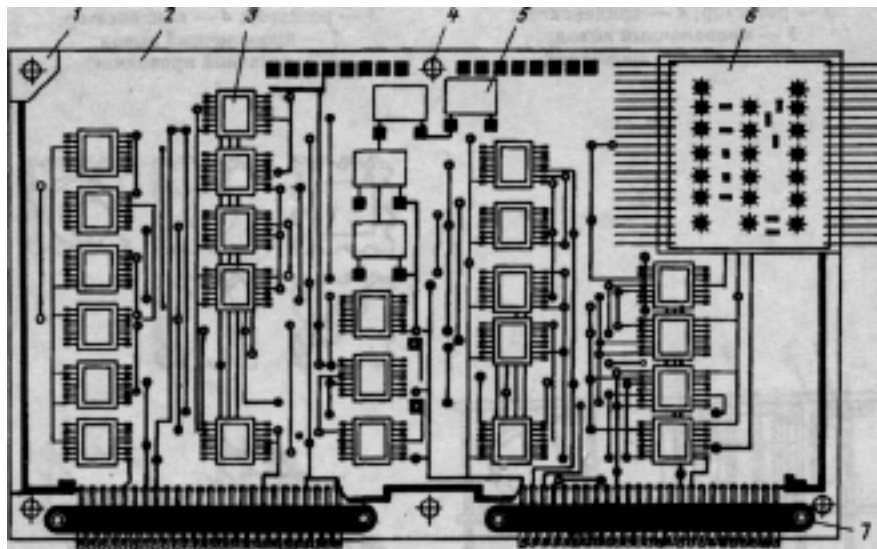


Рис. В.6. Конструкция функциональной ячейки III поколения:
 1 — металлическая накладка (коллектор тепловых стоков); 2 — печатная плата;
 3 — корпусированная ИС; 4 — отверстие для стягивания пакета ячеек винтами;
 5 — навесной конденсатор фильтра; 6 — толсто пленочная МСБ, эквивалентная по сложности рассматриваемой ячейке (приведена для сравнения занимаемых площадей); 7 — соединитель

Ячейки ЭВМ, выполненные по принципу базовых несущих конструкций, называют типовыми элементами замены. Для таких конструкций

величина упаковки элементов в объеме достигает 30 эл/см^3 . К достоинствам таких конструкций относятся: легкость, ремонтпригодность, сравнительно легкий тепловой режим, нерастянутые сроки разработки и производства (образно выражаясь «купи и собери сам»), несложная и хорошо отработанная (с 1950 г.) технология печатного монтажа. Все это обеспечивает невысокую стоимость изделий. Применение же микросхем, изготовление которых основано на групповых методах получения целого набора элементов на подложке или в объеме кристалла, позволяет резко повысить надежность. Так, частота отказов одной ИС, содержащей порядка 100 элементов, равна частоте отказов

всего лишь одного дискретного ЭРЭ, т.е. $I_{ИС} \sim I_{ЭРЭ} = 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$

Таким образом, достижения в области микроэлектроники и ее промышленного внедрения позволили перейти к созданию нового поколения конструкций РЭС — к интегральным радиоэлектронным устройствам. Интегральные радиоэлектронные устройства отличаются малыми массой и габаритами, высокой надежностью, пониженным потреблением энергии, меньшей стоимостью, групповой автоматизированной технологией изготовления компонентов и устройств, применением САПР при проектировании и подготовке производства. Интегральные РЭУ проектируются на новых принципах схемотехники — микросхемотехники [3], в основе которой заложена микроэлектроника. Это наглядно видно из сравнения аналогов РЭС I, II и III, IV поколений (табл. В.2).

Дальнейшие пути миниатюризации РЭС, по которым шло развитие конструкций, в особенности космической и ракетной техники, привели к тому, что для резкого уменьшения массы и габаритов устройств и комплексов надо было отказаться от индивидуальных корпусов ИС и вместо печатных плат для их компоновки ввести более крупные подложки. Иными словами, вместо того чтобы разваривать бескорпусные транзисторы на малых подложках и тем самым получать гибридную ИС, стали делать то же самое, но с бескорпусными ИС на более крупных подложках, например 24×30 или 30×48 мм, т.е. получать БГИС, или микросборку (рис. В.7). Если ГИС предназначалась для широкого применения и корпусировалась, то МСБ стала уже изделием частного применения. Она заменила собой целую печатную плату (см. рис. В.6, верхний правый угол), и поскольку компоновка МСБ в ячейку и далее в блок тоже требовала компактности, сами МСБ стали бескорпусными, а блок — герметичным. Так появились конструкции РЭС IV поколения. На рис. В.8 и В.9 соответственно показаны конструкция функциональной ячейки из двух бескорпусных МСБ и двух корпусированных ИС с ЭРЭ и конструкция герметичного блока на бескорпусных МСБ (припа-

Таблица В.2

РЭС на дискретных ЭРЭ	Интегральные РЭС
Генераторы радио- и СВЧ-частот на ЭВП и дискретных полупроводниковых приборах	Генераторные и усилительные ИС радио- и СВЧ-частот со сложением мощности на общей нагрузке
Антенны СВЧ зеркального типа с сосредоточенным питанием	Антенные фазированные решетки (АФР) с распределенным питанием и сложением мощности в пространстве
Электромеханический привод антенны (механическое сканирование диаграммы направленности антенны)	ЭВМ управления фазой АФР (электронное сканирование диаграммы направленности антенны)
Усилители радиочастот с распределенной избирательностью	Усилители радиочастот на ИС с сосредоточенной избирательностью.
Частотно-избирательные узлы индуктивно-емкостного типа на дискретных катушках индуктивности и конденсаторах	Активные LC-фильтры, интегральные пьезофильтры, фильтры ПАВ, цифровые фильтры на БИС
Интеграторы аналогового типа	Цифровые накопители на БИС
Запоминающие устройства (ЗУ) на ферритовых кольцах и пластинах	Полупроводниковые ЗУ БИС, ЗУ на ЦМД, ПЗС на приборах Джозефсона
Аналоговые устройства автоматики	Цифровые устройства на БИС, СБИС,
Электронно-лучевые трубки	Матричные экраны на ПЗС, светодиодах и электролюминесцентных пленках
Реле и трансформаторы электромагнитные	Реле и трансформаторы бесконтактные оптронные
Радиочастотные кабели	Световоды, волоконная

иваемый корпус условно снят) первых лет внедрения микросборочного конструирования. К достоинствам конструкций IV поколения следует отнести уменьшение массы (в 3-4 раза) и объема (в 5-6 раз) моноблоков, более высокую надежность за счет исключения стандартных разъемов и замены их на гибкие шлейфы, а также сокращение числа паяных соединений (исключение выводов от корпусов), повышение вибро- и ударопрочности. К недостаткам и трудностям в развитии IV поколения конструкций РЭС относятся повышенная теплonaпряженность в блоках и необходимость введения дополнительных теплоотводов (металлических рамок), незащищенность бескорпусных элементов и компонентов МСБ от факторов внешней среды и необходимость полной герметизации корпусов блоков с созданием инертной газовой среды внутри них, более высокая стоимость за счет сложного и дефицитного технологического оборудования, более длительные сроки разработки из

за необходимости разработки самих МСБ, как изделий частного применения, недостаточно количество специалистов этого профиля (как инженеров, так и технического персонала). Однако получение плотности упаковки, равной 100 и более элементов в кубическом сантиметре, даже при средней степени интеграции ИС позволяет разработчикам значительно улучшить не только качественные энергетические параметры РЭС, но и в ряде случаев тактико-технические характеристики объекта.

Появление новой элементной базы (функциональных компонентов, микрокорпусов ИС), новых несущих оснований (печатных плат из новых материалов с высо-

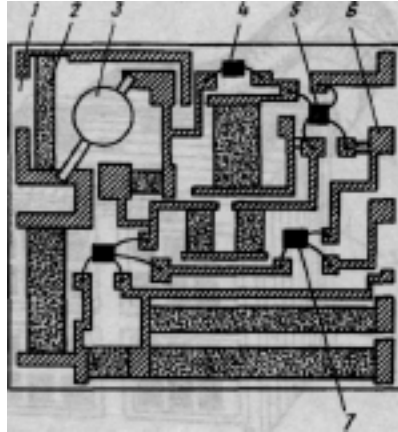


Рис. В.7. Конструкция бескорпусной тонкопленочной микросборки:
 1 — ситалловая подложка;
 2 — тонкопленочный резистор;
 3 — стабилитрон;
 4, 5, 7 — бескорпусные диоды, ИС, транзистор соответственно;
 6 — контактная площадка

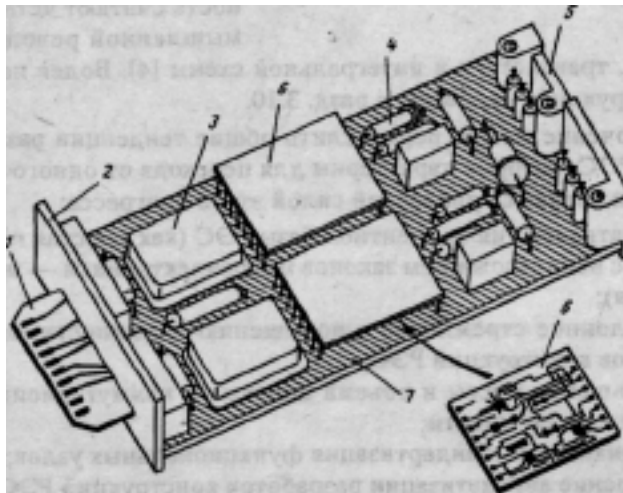


Рис. В.8. Конструкция функциональной ячейки IV поколения:
 1 — соединитель; 2 — передняя стенка; 3 — корпусированная ИС; 4 — навесной ЭРЭ;
 5 — задняя стенка с элементами крепления; 6 — бескорпусная микросборка;
 7 — печатная плата

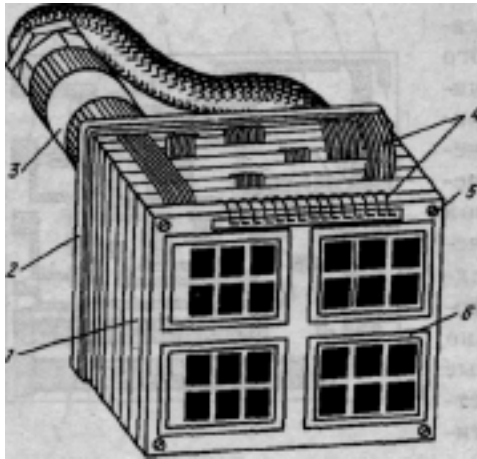


Рис. В9. Конструкция герметичного блока РЭС IV поколения (корпус условно снят):
 1 — функциональная ячейка;
 2 — металлическое основание;
 3 — соединитель; 4 — проволочный монтаж;
 5 — винт крепления;
 6 — бескорпусная микросборка

кой разрешающей способностью до 0,1 мм и без металлизированных отверстий), новых способов сборки и монтажа (групповой автоматизированной сборки и пайки), новых принципов компоновки устройств из суперкомпонентов (интеграции на целой пластине) привело к созданию РЭС еще более компактных, надежных и с меньшей стоимостью, чем известные прототипы. Конструкции таких устройств, выполненные по принципам монтажа на поверхность и интеграции на целой пластине, можно отнести к пятому поколению. Недаром за рубежом появление техники монтажа на поверхность считают четвертой промышленной революцией после лампы, транзистора и интегральной схемы [4]. Более подробно об этих конструкциях изложено в разд. 3.10.

В заключение можно перечислить общие тенденции развития конструкций РЭС, которые характерны для перехода от одного поколения к другому и являются движущей силой этого прогресса:

- 1) миниатюризация элементной базы РЭС (как простая геометрическая, так и с использованием законов микроэлектроники — микроминиатюризация);
- 2) неуклонное стремление к повышению надежности элементов и компонентов конструкций РЭС;
- 3) уменьшение массы и объема монтажа и коммутационных цепей, повышение их надежности;
- 4) унификация и стандартизация функциональных узлов;
- 5) внедрение автоматизации разработок конструкций РЭС и автоматизированных способов их изготовления;
- 6) непрерывный рост интеграции конструкций как за счет интеграции элементной базы, так и благодаря новым методам компоновки;
- 7) внедрение элементов и узлов функциональной электроники.

1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ РЭС

1.1. Требования к конструкциям РЭС и показатели их качества

Основными требованиями, предъявляемыми к конструкциям РЭС, являются высокое качество энергоинформационных (функциональных) показателей, помехозащищенность, надежность, прочность, жесткость, технологичность, экономичность и серийноспособность конструкции при малых материалоемкости и потребляемой мощности. Любая вновь разрабатываемая конструкция должна быть патентно чистой и сертификационной.

Конструкции, отвечающие этим требованиям, должны обладать минимальными массой m , объемом V , потребляемой мощностью P , частотой отказов λ , стоимостью C и сроком разработки T ; должны быть вибро- и ударопрочны, работать в нормальном тепловом режиме и иметь достаточно высокий для производства процент выхода годных изделий. Показатели, характеризующие эти качества, могут быть разбиты на следующие группы: абсолютные (в абсолютных величинах), комплексный (безразмерный обобщенный), удельные (в удельных величинах) и относительные (безразмерные, нормированные).

К абсолютным показателям относят массу конструкции, ее объем, потребляемую мощность, частоту отказов, стоимость и срок разработки.

Иногда эти показатели называют материальными показателями, показывающими, из чего и как сделано устройство. Энергоинформационные параметры в этих случаях называют функциональными показателями, характеризующими, для чего и что может делать устройство. Из этих двух групп могут быть получены более общие показатели качества, такие как комплексный показатель и удельные коэффициенты качества.

Комплексный показатель качества представляет собой сумму нормированных частных материальных показателей со своими «весовыми» коэффициентами, или коэффициентами значимости этого параметр для суммарного качества конструкции:

$$K = j_m m_0 + j_v V_0 + j_L L_0 + j_p P_0 + j_c C_0 + j_T T_0 \quad (1.1)$$

где $m_0, V_0, L_0, P_0, C_0, T_0$ — нормированные значения материальных параметров относительно заданных по техническому заданию (ТЗ) либо отношения этих материальных параметров для разных сравниваемых вариантов конструкции; $j_m, j_v, j_L, j_p, j_c, j_T$ — коэффициенты значимости частных материальных параметров, определяемые методом экспертных оценок; обычно их значения выбирают в пределах от 0 до 1.

Выражение (1.1) показывает, что чем меньше каждый из материальных параметров, тем выше качество конструкции при одних и тех же функциональных параметрах. Коэффициенты значимости определяются группой экспертов (желательно в количестве не менее 30 человек), которые в зависимости от назначения и объекта установки РЭС присваивают каждый то или иное значение коэффициента значимости параметрам. Далее их результаты оценки суммируются, определяются средние и среднеквадратичные значения этих коэффициентов, находятся допустимые поля отклонений и по ним устраняют «промахи» экспертов, которые исключают из общей суммы, и далее повторяют те же операции обработки данных. В результате получают средние «достоверные» значения этих коэффициентов, а тем самым и само уравнение для расчетов.

Пример 1.1. Для бортового ракетного РЭС выбрать лучший вариант из двух методов конструирования: на печатных платах с корпусированными ИС широкого применения или на металлических рамках с бескорпусными микросборками.

Примем следующие значения коэффициентов значимости для ракетных РЭС $j_m=1$, $j_v=j_L=0.8$, $j_c=0.5$, $j_p=0.4$, $j_m=0.5$. Поскольку потребляемая мощность РЭС при переходе от корпусированной ИС к ее бескорпусному варианту не меняется, то четвертую составляющую в уравнении (1.1) исключим. Для упрощения расчетов не будем учитывать и срок разработки. Из литературы [5] известно, что при выборе второго варианта масса уменьшается в три раза, объем — в пять раз, частота отказов — в два раза, а стоимость увеличивается в три раза. Тогда в первом варианте значения всех нормированных показателей (самих относительно себя) будут равны 1, а во втором варианте составят соответственно $m_0=0.33$, $V_0=0.2$, $L_0=0.5$ и $C_0=3$. Комплексные показатели качества для первого и второго вариантов будут равны соответственно: $K_1=1 \times 1 + 0.8 \times 1 + 0.8 \times 1 + 0.5 \times 1 = 3,1$ и $K_2=1 \cdot 0.33 + 0.8 \cdot 0.2 + 0,8 \cdot 0,5 + 0,5 \cdot 3 = 2,4$. Таким образом, лучшим вариантом является второй.

К удельным показателям качества конструкции относят удельные коэффициенты конструкций, плотность упаковки элементов на площади или в объеме, удельную мощность рассеяния на площади или в объеме (теплонпряженность конструкции), удельную массу (плотность) конструкции, величину истечения газа из объема конструкции (степень герметичности). По удельным коэффициентам оценивают прогресс развития новых конструкций по сравнению с предыдущими аналогами и прототипами. Они определяются по формуле $k = M/\Phi$, где M — материальные, а Φ — функциональные показатели, и для каждого из типов радиоустройств или блоков имеют конкретную размерность. Так,

для антенных устройств, если в качестве основного параметра взять массу, то удельный коэффициент $k_A = m/G$ кг/ед. усиления, где G — коэффициент усиления антенны; для передающих устройств $k_{пер} = m/P_{вых}$ кг/Вт, где $P_{вых}$ — выходная мощность передатчика.

Поскольку приемные устройства характеризуются многими функциональными параметрами (коэффициентом усиления, коэффициентом шума, полосой пропускания, выходной мощностью и др.), функциональная сложность и качество выполняемых функций для микросборочных конструктивов могут быть оценены количеством разработанных микросборок $n_{МСБ}$, тогда $k_{пр,м} = m/n_{МСБ}$ кг/МСБ. Аналогично можно рассчитать удельные коэффициенты в случае других материальных параметров и получить для сравнения аналогов их величины, выраженные в см³/ед. усиления, см³/Вт, см³/МСБ, р/ед. усиления, р/Вт, р/МСБ и т.п. Такие оценки наиболее наглядны и не требуют доказательств.

Плотности упаковки элементов на площади и в объеме оцениваются следующими выражениями: $g_S = N/S$ и $g_V = N/V$ соответственно, где N — количество элементов; S и V — занимаемые ими площадь или объем соответственно. Количество элементов определяется как $N = N_{ис} n_{э} + n_{эрэ}$, где $N_{ис}$ — количество ИС в устройстве; $n_{э}$ — количество элементов в одной ИС (кристалле или корпусе); $n_{эрэ}$ — количество навесных электрорадиоэлементов в конструкции ячейки, блока, стойки.

Плотность упаковки является главным показателем уровня интеграции конструктивов того или иного уровня. Так, если для полупроводниковых ИС с объемом кристалла 1мм³ и количеством элементов в нем, равным 40 единицам, $g_{ис} = 40 \times 10^3$ эл/см³, то на уровне блока цифровых РЭС $g_{б} = 40$ эл/см. Уменьшение плотности упаковки происходит по следующим причинам: кристаллы корпусируются; далее корпусированные ИС размещаются на плате с зазорами; при компоновке ФЯ в блок опять-таки появляются дополнительные зазоры между пакетом ФЯ и внутренними стенками корпуса. Да и сам корпус имеет объем стенок и лицевой панели, в котором нет полезных (схемных) элементов. Иначе говоря, при переходе с одного уровня компоновки на другой происходит потеря (дезинтеграция) полезного объема.

Коэффициент дезинтеграции определяется отношением суммарного объема к полезному объему. Для блока цифрового типа коэффициент дезинтеграции $q_v = V_{б} / (N_{ис} \cdot V_{ис})$, где $V_{ис}$ — объем одной

микросхемы (бескорпусной либо корпусированной в зависимости от метода конструирования). Следовательно, можно записать, что

$$g_s = N_{uc} n_{\text{эл}} / (q_v \times N_{uc} \times V_{uc}) = g_{uc} / q_v \quad (1.2)$$

где $g_{uc} = n_{\text{эл}} / V_{uc}$ — плотность упаковки элементов в ИС.

В бескорпусной ИС цифрового типа малой степени интеграции эта величина составляет 40 тыс. эл/см³. При установке кристалла бескорпусной ИС в корпус, например IV типа, происходит увеличение объема примерно в 200 раз, а при установке корпусированных ИС на плату и компоновке их в объеме корпуса — еще в пять раз, т.е. суммарный коэффициент дезинтеграции составляет уже 10³, при этом $g_{\delta} = 40 \text{ эл/см}^3$, что характерно для блоков III поколения РЭС цифрового типа.

Из выражения (1.2) следует, что при конструировании цифровых устройств высокой интеграции, кроме применения БИС и СБИС, требуется и достаточно компактная компоновка.

Аналоговые РЭС не содержат четко выраженных регулярных структур активных элементов: их число становится соизмеримым и даже меньшим, чем число пассивных навесных ЭРЭ (обычно одну аналоговую ИС «обрамляют» до 10 пассивных элементов — конденсаторов вместе с катушками и фильтрами), поэтому коэффициенты дезинтеграции объема еще более возрастают (в 3-4 раза). Из этого следует, что нельзя сравнивать конструктивы разного уровня иерархии и различные по назначению и принципу действия, т.е. этот показатель качества не является универсальным для всех РЭС. К тому же, если в одной компактной конструкции применили ИС малой степени интеграции (до 100 элементов на корпус), а в другой плохо скомпонованной конструкции — БИС, то может оказаться, что вторая конструкция по этому показателю лучше, хотя очевидно, что она хуже. Поэтому при применении элементных баз разной степени интеграции сравнение конструкций по плотности упаковки неправомерно.

Таким образом, плотность упаковки элементов в объеме конструктива является объективной оценкой качества конструкции, но пользоваться этим критерием для сравнения надо грамотно.

Удельная мощность рассеяния определяет тепловую напряженность в объеме конструктива и рассчитывается как

$P_{уд \text{ рас}} = P_{рас} / V$, где $P_{рас} = (0,8 \dots 0,9) P$ для цифровых регулярных структур. В аналоговых (особенно приемоусилительных) ячейках и блоках мощность рассеяния и тепловая напряженность невелики, и тепловой режим обычно бывает нормальным. В устройствах цифрового типа чем выше требова-

ния к быстрдействию вычислительных средств, тем больше величин потребляемой мощности и выше тепловая напряженность. Для РЭС на бескорпусных МСБ эта проблема еще более усугубляется, так как объем при переходе от III поколения к IV уменьшается в 5-6 раз. Поэтому в конструкциях блоков цифрового типа на бескорпусных МСБ должны быть мощные теплоотводы (металлические рамки, медные печатные шины и т.п.). В некоторых случаях в бортовых РЭС применяют и системы охлаждения, тип которых выбирается по критерию удельной мощности рассеяния с поверхности блока ($P_{уд\ расc} = P_{расc} / S \text{ Вт/дм}^2$). Для блоков цифрового типа III поколения допустимая тепловая напряженность составляет 20...30 Вт/дм³ в условиях естественной конвекции и при перегреве корпуса относительно среды не более чем на 40°C, а для блоков IV поколения — порядка 40 Вт/дм и более.

Удельная масса конструкции $m' = m/V$. Этот параметр ранее считался главным критерием оценки качества аппаратуры. Было принято условное деление конструкций на «тонущую РЭА» ($m' > 1 \text{ г/см}^3$) и «плавающую РЭА» ($m' < 1 \text{ г/см}^3$). Если конструкция — тонущая, то считалось, что она компактна и хорошо скомпонована (мало воздуха и пустот в корпусе). Однако с появлением конструкций РЭС IV поколения, в которых преобладающей долей массы являются металлические рамки и корпус с более толстыми стенками (для обеспечения требуемой жесткости корпуса при накачке внутрь сухого азота), даже плохо скомпонованные ячейки оказывались тонущими. И чем больше расходовался металл, тем более возрастал этот показатель, уже не отражающий качество компоновки и конструкции в целом. Поэтому сравнивать конструкции по этому критерию отказались, но он оказался полезным для решения другой задачи: распределения ресурса масс в конструктивах (см. разд. 3.9).

Степень герметичности конструкции D определяется величиной истечения газа из объема конструкции:

$$D = \frac{V_2 p}{t} \quad (1.3)$$

где V_2 — объем газа в блоке, дм³; p — перепад внутреннего и внешнего давлений (избыточное давление) в блоке, Па (1 Па = 7,5 мкм рт.ст.); t — срок службы или хранения, с.

Для блоков объемом $V_2 = 0,15 \dots 0,2 \text{ дм}^3$ в ответственных случаях при нормальном давлении к концу срока службы в течение восьми лет степень герметичности

$$D = 6,65 \cdot 10^{-6} \text{ дм}^3 \cdot \text{Па/с} \quad (5,5 \cdot 10^{-5} \text{ дм}^3 \cdot \text{мкм рт.ст/с});$$

в менее ответственных случаях полная вакуумная герметизация не обеспечивается, степень герметичности может быть уменьшена до $1,33 \cdot 10^{-4} \text{ дм}^3 \cdot \text{Па/с}$ ($10^{-3} \text{ дм}^3 \cdot \text{мкм рт.ст/с}$).

К относительным показателям относятся коэффициенты дезинтеграции объема и массы, показатель функционального разукрупнения, величина перегрузки конструкции при вибрациях и ударах, а также многие параметры технологичности конструкции, такие как коэффициенты унификации и стандартизации, коэффициент повторяемости материалов и изделий электронной техники, коэффициент автоматизации и механизации и др.

В конструкциях РЭС разного уровня компоновки при корпусировании ИС, компоновке их в ячейки и далее в блоки и стойки происходит потеря полезных объемов, а следовательно, и масс. Величина этих потерь может быть весьма значительна. Оценка потерь (дезинтеграции) объемов и масс проводится с помощью коэффициентов дезинтеграции q_v и q_m соответственно, определяемых как отношение суммарного объема (массы) конструктива к его полезному объему (массе):

$$q_v = V/V_N, \quad q_m = m/m_N, \quad (1.4)$$

где $V_N = \sum V_{CЭ}$, $m_N = \sum m_{CЭ}$ — полезные объем и масса схемных элементов.

Коэффициенты дезинтеграции объема (или массы) $q_{V(m)}$ показывают, во сколько раз увеличивается суммарный объем (или масса) комплектующих изделий при переходе с одного уровня компоновки на более высокий. Например, при переходе от нулевого уровня (корпусированных микросхем) к первому (функциональной ячейке) имеем $q_{v(m)} = V(m)_{\text{яя}} / \sum V(m)_{\text{ис}}$, при переходе от ячейки к блоку

$q_{v(m)} = V(m)_{\text{б}} / \sum V(m)_{\text{оя}}$ и т.д., где $V(m)_{\text{ис}}$, $V(m)_{\text{оя}}$, $V(m)_{\text{б}}$ — соответственно объемы (или массы) микросхемы, ячейки, блока.

Коэффициенты дезинтеграции, как и плотность упаковки, реально отражают качество конструкции, в частности ее компактность, но и они не могут быть использованы для сравнения конструктивов, относящихся к разным поколениям, разным уровням конструктивной иерархии, или РЭС различного назначения и принципа действия.

Анализ существующих наиболее типовых конструктивов разных поколений и различного назначения позволил получить средние значе-

ния их коэффициентов дезинтеграции объема и массы (табл. 1.1). В таблице приведены и значения удельной массы конструктивов.

Таблица 1.1

Вариант конструктива	q_v		q_m		$m',$ г/см ³
	КТЕ*-	ФЯ-	КТЕ*-	ФЯ-	
Блок разъемной конструкции из ФЯ на печатных платах с ИС в корпусах II типа (цифровой)	10,2	1,8	4,7	1,5	0,5
Блок книжной конструкции из ФЯ на печатных платах с ИС в корпусах IV типа (цифровой)	6,4	1,8	3,2	1,3	0,52
Блок книжной конструкции из ФЯ на бескорпусных МСБ (цифровой) при: односторонней компоновке; двухсторонней компоновке	11 5,6	1,9 1,9	7,7 4,8	3,0 3,0	1,07 1,2
Субблок пенальной конструкции на корпусированных ИС (аналоговый)	10,5	—	6,6	—	0,6
Субблок пенальной конструкции на бескорпусных МСБ (аналоговый)	17,4	— -	11,5	—	1,6
Модуль СВЧ на микрополосковых МСБ при: односторонней компоновке; двухсторонней компоновке	6,7 5,6	—	14,0 8,5	—	0,92 0,97
Субблок из бескорпусных МСБ с теплоотводом (силовой)	9,4	—	1,5	—	1,3

* КТЕ — конструктивно-технологическая единица: для РЭСIII поколения — корпусированная ИС, для РЭС IV поколения — бескорпусная МСБ

Показатель функционального разукрупнения (ПФР) конструкции представляет собой отношение количества элементов N в конструктиве к количеству выводов M из него: $ПФР = N / M$. Например, для цифровой бескорпусной МСБ, содержащей 12 бескорпусных ИС с 40 элементами в каждом кристалле ($N=40 \cdot 12=480$ элементов) и 16 выходными контактными площадками $ПФР= 480/ 16 = 30$. Чем выше ПФР, тем ближе конструкция к конструктиву высокой интеграции, тем меньше монтажных соединений, тем выше надежность и меньше масса и габариты. Наибольшее число функций и элементов монтажа содержат БИС и СБИС. Однако и у них есть предел степени интеграции, определяемый количеством допустимых выводов от активной площади кристалла к периферийным контактными площадкам (разд. 1.4).

Наконец, перегрузка n действующих на конструкцию вибраций или ударов определяется как отношение возникающего от их действия ускорения масс элементов конструкции к ускорению свободного падения: $n = a/g$, где a — ускорение при вибрации (или ударе). Вибро- и ударопрочность конструкции определяются допустимыми перегрузками при вибрациях и ударах, которые может выдержать конструкция без разрушения связей между элементами. Для того чтобы эти свойства были обеспечены, необходимо, чтобы реально возникающие в тех или иных условиях эксплуатации перегрузки не превышали предельно допустимые для конкретной конструкции.

1.2. Системный подход к конструированию РЭС

В общем смысле «система — нечто целое, представляющее собой единство закономерно расположенных и находящихся во взаимной связи частей» [1]. При создании той или иной системы (информационной, энергетической, организационной, общественно-й, образования и др.) необходимо руководствоваться двумя основными правилами:

1) выявлять и устанавливать взаимные связи субъектов системы и среды во всей их совокупности, т.е. как внутренние (между субъектами), так и внешние (между ними и средой существования);

2) выработать требования на связи, качество и объем функций подсистем (субъектов) таким образом, чтобы они улучшали качество и функционирование системы в целом. В противном случае «получить оптимальную систему из всех оптимальных подсистем невозможно», т.е. нужны компромиссы в выборе решений.

Метод оптимального решения задачи проектирования систем, основанный на всестороннем целостном рассмотрении системы и ее изменении в процессе взаимодействия со средой, называется системным подходом. Каждый субъект системы является частью системы высшего ранга («большой системы»), но в то же время он может быть и большой системой для подсистем низшего ранга, т.е. существует системная иерархия. Кроме того, на разработку каждого субъекта системы задаются требования, определяемые требованиями системы высшего ранга, а требования на сам субъект определяют требования на разработку подсистем низшего ранга. Эти требования в общем случае представляют собой группу данных D , состоящую из определенных подгрупп. Применительно к РЭС покажем это на примере бортовых РЭС IV поколения самолета. На рис. 1.1 показана системная иерархия самолета [2]. Здесь уровни иерархии и их звенья (субъекты) разбиты по функциональной значимости решаемых задач, обеспечивающих выполнение основной целевой функции самолета и основных функций подсистем низшего

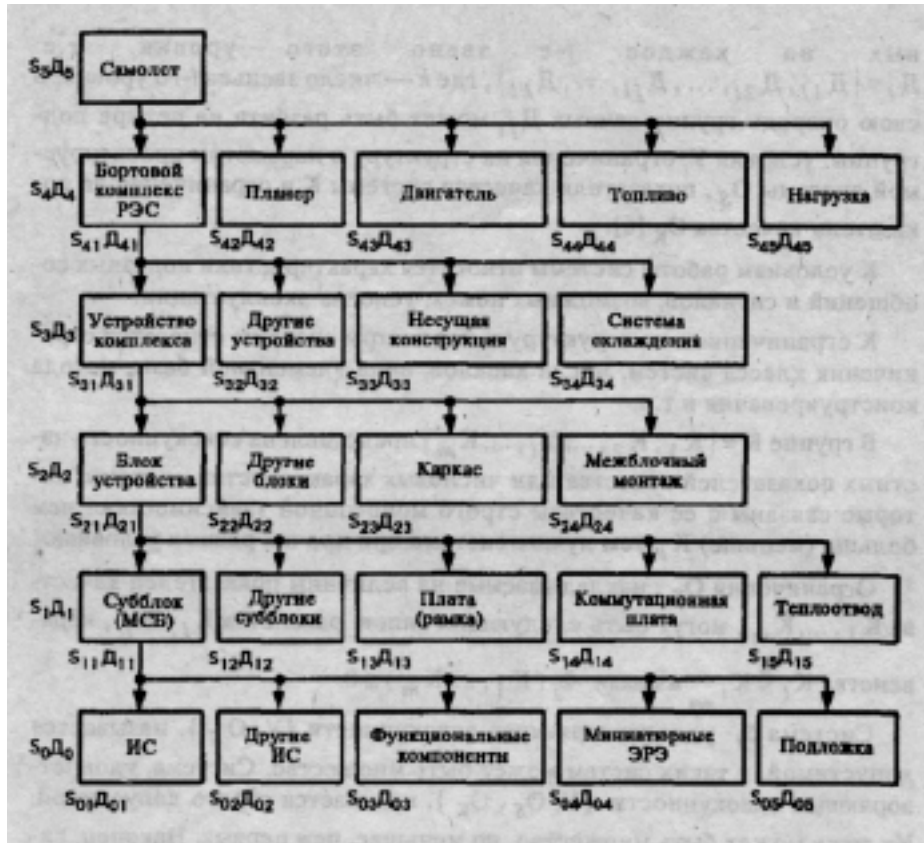


Рис. 1.1. Системная иерархия самолета

ранга. Каждый уровень иерархии имеет свое обозначение S_l , и группу данных D_j , где $l=0,1,2,3,\dots$ — уровень иерархии, начиная с нулевого, соответствующего элементной базе РЭС. Следует отметить, что уровни представленной системы не являются уровнями иерархии РЭС по функциональной или конструктивной сложности, так как они отражают не столько конструкции (которые могут быть выполнены разновариантными), сколько те задачи (во многом совпадающие с делением по функциональной сложности), которые должен выполнять каждый субъект системы. Например, планер надо рассматривать не как конструкцию моноплана с двигателями, а как устройство, обеспечивающее полет в атмосфере и несущее основание всех остальных частей самолета. Группа данных l -го уровня иерархии состоит из совокупности дан-

ных на каждое j -е звено этого уровня, т.е. $D_l = \{D_{1l}, D_{2l}, \dots, D_{jl}, \dots, D_{kl}\}$, где k — число звеньев l -го уровня. В свою очередь группа данных D_{jl} может быть разбита на четыре подгруппы: условия Y , ограничения на структуру и параметры проектируемой системы O_S , показатели качества системы K и ограничения на показатели качества O_K [6].

К условиям работы системы относятся характеристики полезных сообщений и сигналов, возможных помех, условия эксплуатации.

К ограничениям на структуру и параметры системы относятся ограничения класса систем, числа каналов, вида элементной базы, метода конструирования и т.п.

В группе $K = \{K_1, K_2, \dots, K_m\}$ представлена совокупность частных показателей качества или числовых характеристик системы, которые связаны с ее качеством строго монотонной зависимостью: чем больше (меньше) K_i , тем лучше система при прочих равных условиях

Ограничения O_K , накладываемые на величины показателей качества K_1, \dots, K_m , могут быть следующих типов: равенства

$$K_i = K_{i0}, \text{ неравенства } K_i <> K_{i \text{ доп.}} \text{ и связи } \Phi_i(K_1, \dots, K_m) \leq 0.$$

Система S , удовлетворяющая совокупности $\{Y, O_S\}$, называется допустимой, и таких систем может быть множество. Система, удовлетворяющая совокупности $\{Y, O_S, O_K\}$, называется строго допустимой.

Их тоже может быть множество, но меньшее, чем первых. Наконец, система, обладающая наилучшим (наименьшим или наибольшим) значением вектора показателей качества K при всех остальных требованиях, считается оптимальной. Для ее выбора необходимо выбрать критерий оптимальности (или критерий предпочтения), т.е. выбрать, какое значение вектора K (или представление его в скалярной форме K_i) считать лучшим.

Разработка системы данных на тот или иной субъект системы разбивается на внешнее и внутреннее проектирования. Под внешним проектированием понимают обоснование исходных данных на субъект системы: условий работы субъекта, ограничений, накладываемых на структуру, состав показателей качества, и предъявляемых к ним требований. На этапе внутреннего проектирования вначале определяют принципы построения субъекта системы, его деление на подсистемы низшего ранга, разрабатывают исходные данные на них, далее проводят выбор элементной базы и синтез (оптимизацию по критерию предпочтения)

конструкции. Последовательное решение этих задач на разных уровнях (с верхнего до нижнего) называется сквозным проектированием РЭС. На рис. 1.2 показан пример сквозного проектирования бортовой РЛС, построенной на микросборках. Тактические данные на самолет (L — дальность полета, v — скорость самолета) определяют исходные данные на разработку РЛС (R — дальность обнаружения, $m_{РЛС}$ — масса РЛС). В

свою очередь, эти выходные данные определяют исходные данные на МСБ приемно-усилительного тракта (ПУТ) (Q — отношение «сигнал/ шум», $P_{ш}$ — плотность мощности шума приемника, K — коэффициент усиления, $m_{пут}$ — масса тракта и др.). Далее от внешних данных переходят к внутренним ($f_{пр}$ — промежуточная частота ПУТ, Δf — его полоса пропускания,

АЧХ — амплитудно-частотная характеристика и ЭЗ — электрическая принципиальная схема). На нулевом уровне выбирается по критерию предпочтения элементная база (ИС, ЭРЭ), материал подложки и проводится расчет топологии МСБ.

Может быть предложен следующий порядок оптимального проектирования на уровне радиоустройства [7]:

1) совокупность исходных данных $D = \{D_1, \dots, D_n\}$ разделяется на подгруппы: $Y = \{Y_1, \dots, Y_k\}$, $O_s = \{O_{s1}, \dots, O_{sr}\}$, $K = \{K_1, \dots, K_m\}$, $O_k = \{O_{k1}, \dots, O_{kn}\}$;

2) исходя из назначения устройства (данные подгруппы Y) составляется его математическая модель в виде связывающей основные энергетические и информационные характеристики функции $F\{K_1, \dots, K_m\}$, которая в случае затруднений может быть частично или полностью заменена упорядоченной совокупностью показателей качества K ;

3) составляется электрическая структурная схема устройства;

4) для выбранной (или заданной) элементной базы и метода конструирования определяются коэффициенты k , устанавливающие связь с ним

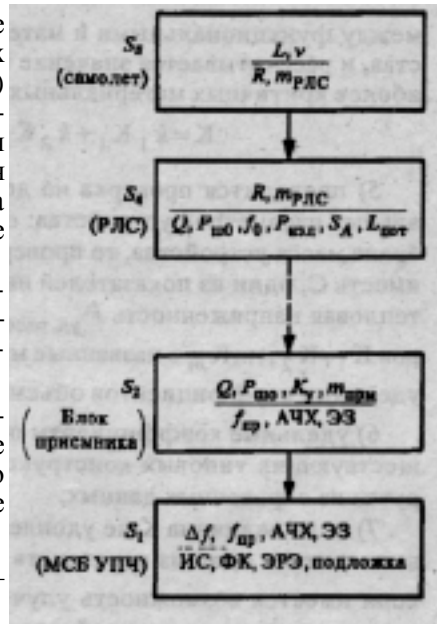


Рис. 1.2. Примеро сквозного проектирования бортовой РЛС

между функциональными и материальными характеристиками устройства, и рассчитывается значение критерия предпочтения (одного из наиболее критичных материальных параметров):

$$K = k_1K_1 + k_2K_2 + \dots + k_mK_m;$$

5) проводится проверка на допустимость значений других материальных параметров устройства: если, например, в качестве K была выбрана масса устройства, то проверке подлежат объем устройства V , стоимость C , один из показателей надежности (интенсивность отказов λ), тепловая напряженность $P_{уд.расс.}$; пересчет функциональных параметров K_1, K_2, \dots, K_m в названные материальные производится с помощью удельных коэффициентов объема k_V , стоимости k_C и т.д.;

6) удельные коэффициенты определяются расчетным путем для существующих типовых конструкций аналогичного назначения или берутся из справочных данных;

7) если величина K не удовлетворяет заданным требованиям или не выполняется одно из неравенств $V \leq V_{доп}$, $C \geq C_{доп}$, $\lambda \geq \lambda_{доп}$ а также если имеется возможность улучшения (минимизации) K , то изменяют структурную схему устройства или значения показателей качества в пределах ограничений O_S и O_K или же пересматривают элементную базу с целью уменьшения коэффициентов k_i для критичных функциональных параметров K_i ;

8) окончательное решение о правильности структурного построения устройства принимают после проверки качества по комплексному показателю (разд. 1.1).

Пример 1.2. Требуется провести оптимальное конструирование приемопередающего устройства РЛС самолета.

1. Составление перечня исходных данных

Подгруппа данных $У$, определяющих назначение устройства и воздействия внешней среды: назначение — авиационная техника (самолет с дальностью полета L и скоростью v); тип устройства — приемопередающее устройство РЛС для обнаружения целей по скорости.

Подгруппа структурных ограничений O_S : зондирующий сигнал передатчика РЛС — непрерывный (или квазинепрерывный); отраженный от цели сигнал — медленно флуктуирующий; направление на цель известно; приемопередатчик должен частично или полностью выполняться на микросборках; должна рассматриваться возможность использования принципа многоканальности.

Установлены и обоснованы следующие исходные энергоинформационные данные: R — дальность обнаружения цели; σ — эффективная поверхность рассеяния цели; f_0 — несущая частота передатчика; $f_{ПР}$ — промежуточная частота приемника; Δv_u — пределы измерения радиальной скорости цели; Q — отношение сигнал/шум; $P_{Ш0}$ — плотность мощности шума приемника; $T_{Обз}$ — время обзора по скорости; $L_{ном}$ — потери сигнала в приемопередатчике; K_y — коэффициент усиления напряжения в приемнике; $m_{ПРМ}$ — масса приемника.

Показатели качества (подгруппа К) — функциональные параметры: $P_{изл}$ — мощность излучения передатчика, N — число приемных каналов; материальные параметры: $m_{плс}$ — масса приемопередатчика; A его интенсивность отказов. Ограничения на показатели качества (подгруппа O_k): $P = P_{дон}$, $m \leq m_{дон}$, $A \leq A_{дон}$ где первые части неравенств представляют собой допустимые значения функциональных и материальных параметров. Будем считать, что

$$P_{дон} = 100 \text{ Вт}, m_{дон} = 5 \text{ кг}, A_{дон} = 10^{-4} \text{ 1/ч}$$

2. Формирование математической модели приемопередатчика

На основании общего уравнения радиолокации устанавливаем связь между O_S и K :

$$Q = PT_{обз} \frac{S_A^2 L_{ном} S}{P_{ш0} 4\pi R^4 I^2}$$

где S_A — площадь поверхности антенны приемопередатчика; λ — дли-на волны.

При одноканальной структуре приемопередатчика ширина полосы приемника

$$\Delta F_{\phi} = \Delta F_{ц} = \frac{2pf_0 \Delta V_{ц}}{C_0}$$

где c_0 — скорость света; $\Delta F_{ц}$ — диапазон доплеровских частот, а не-обходимое время обзора составит $T_{Обз} = 1/\Delta F_{ц} = 1/\Delta F_{\phi}$.

При многоканальной структуре приемопередатчика предусматриваются N параллельно включенных приемных каналов с более узкими полосами ΔF_{ϕ_k}

Поэтому возможное время пребывания сигнала в каждом из каналов (время наблюдения) $T_{наб} = 1/\Delta F_{\phi_k}$, время обзора $T_{обз} = N T_{наб} = \frac{N}{\Delta F_{\phi_k}}$

После введения (1.5) и решения уравнения модели относительно показателей качества приемопередатчика окончательно получим

$$PN = Q \frac{P_{ш0} \Delta F_{\phi_k} 4pR^4 I^2}{S_A^2 L_{пот} S}$$

По условиям задачи правая часть является постоянной величиной

$$PN = A = const.$$

В дальнейшем будем считать, что $A = 100$ Вт.

3. Составление электрической структурной схемы приемопередатчика

В качестве первого варианта приемопередатчика рассмотрим одноканальную структуру с поиском по частоте. Электрическая структурная схема одноканального приемопередатчика приведена на рис. 1.3.

Принимаем решение строить передатчик на основе электровакуумных приборов (ЭВП), поскольку на полупроводниковой элементной базе трудно получить требуемую мощность передатчика.

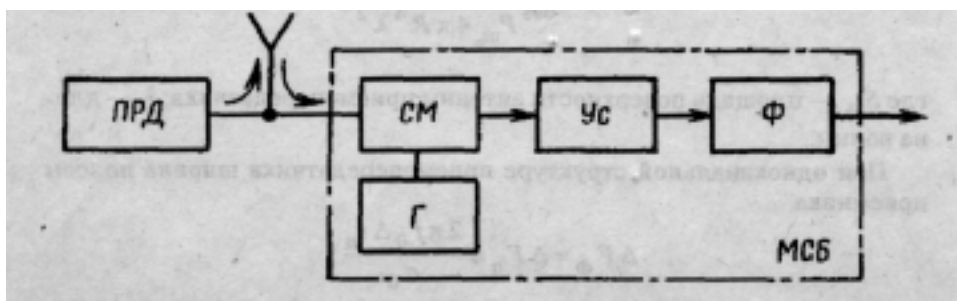


Рис. 1.3. Электрическая структурная схема одноканального приемопередатчика бортовой РЛС.

Приемный тракт приемопередатчика ПРД может быть выполнен на элементной базе радиоаппаратуры IV поколения. В качестве конструктива тракта выбираем микросборку (на схеме рис. 1.3 выделена пунктиром), состоящую из функциональных элементов: смесителя $СМ$, гетеродина $Г$, усилителя $Ус$ и фильтра Φ .

Произведем оценку принятого решения, считая, что критерием предпочтения является суммарная масса приемопередатчика. Как показано в [7], для передатчиков на ЭВП удельный коэффициент массы (с учетом вторичного источника питания (ВИП) и коэффициента дезинтеграции) $k_p = 0,5 \text{ кг/Вт}$.

Функциональным параметром приемника будем считать количество приемных каналов $N_{прм}$. При выполнении канала в виде микросборки легко определить ее массу $m_{МСБ} = 0,05 \text{ кг}$ и, следовательно, удельный коэффициент массы приемника $k_N = 0,05 \text{ кг/канал}$.

Таким образом, суммарная масса одноканального приемопередатчика может быть определена как

$$m_1 = k_p P + k_N N_{прм} = 0,5 \cdot 100 + 0,05 \cdot 1 = 50,05 \text{ кг}.$$

Поскольку $m_{дон} = 5 \text{ кг}$, требование к массе приемопередатчика при принятом структурном построении не выполняется. Одновременно не выполняется и требование к надежности. Интенсивность отказов передатчика на ЭВП составляет 10^{-4} 1/ч , приемника в виде МСБ 10^{-6} 1/ч . Отсюда $\lambda_1 = 10^{-4} + 0,01 \cdot 10^{-4} = 1,01 \cdot 10^{-4} > \lambda_{дон}$

Поэтому рассмотрим второй вариант структурной схемы (рис. 1.4) с многоканальным приемником. Использование многоканального приемника дает возможность за счет незначительного увеличения массы приемной части существенно снизить массу передатчика. Каждый приемный канал выполняется в виде микросборки и содержит гетеродин, перестраиваемый в пределах $\Delta F_{ц} / N_{прм}$, смеситель, усилитель и фильтр с полосой $\Delta F_{фк}$. Как и в первом варианте, для построения передатчика используем ЭВП.

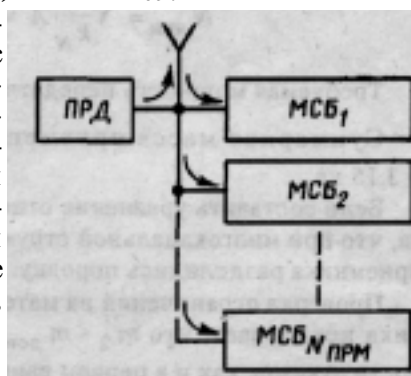


Рис. 1.4. Электрическая структурная схема приемопередатчика бортовой РЛС с

Суммарная масса (критерий предпочтения) приемопередатчика с многоканальным приемником определяется по уже известной формуле

$$m = k_P P + k_N N_{\text{прм}} \quad (1.7)$$

и зависит от числа приемных каналов $N_{\text{прм}}$.

Оптимальное количество каналов, которому соответствует минимальная суммарная масса приемопередатчика, можно найти простым перебором или с помощью одного из методов нелинейного программирования. Воспользуемся методом множителей Лагранжа [2]. По условию задачи целевая функция (1.7) должна быть минимизирована при ограничении $\varphi = PN_{\text{прм}} - A = 0$.

Функция Лагранжа записывается в виде

$$\Phi = k_P P + k_N N_{\text{прм}} + \beta (PN_{\text{прм}} - A) \quad (1.8)$$

где β — неопределенный множитель Лагранжа.

Условием экстремума функции (1.8) является следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} \delta \Phi / \delta P &= k_P + \beta N_{\text{прм}} = 0; \\ \delta \Phi / \delta N_{\text{прм}} &= k_N + \beta P = 0; \\ \delta \Phi / \delta \beta &= PN_{\text{прм}} - A = 0. \end{aligned} \quad (1.9)$$

В результате ее решения находим

$$N = \sqrt{\frac{k_P}{k_N}} A = \sqrt{\frac{0.5 \cdot 100}{0.05}} \approx 30$$

$$\text{Требуемая мощность передатчика } P = A / N_{\text{прм}} = \frac{100}{30} = 3,3 \text{ Вт}$$

Суммарная масса приемопередатчика $m_2 = 0,5 \cdot 3,3 + 0,05 \cdot 30 = 3,15$ кг.

Если составить уравнение относительно масс, то нетрудно убедиться, что при многоканальной структуре приемника массы передатчика и приемника разделились поровну.

Проверка ограничений на материальные параметры приемопередатчика показывает, что $m_2 < m_{\text{дон}}$, однако ограничение на интенсивность отказов, как и в первом варианте, не выполняется: $\Lambda_2 = 10^{-4} + 30 \cdot 10^{-6} = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ч} > \Lambda_{\text{дон}}$.

Продолжаем поиск лучшего варианта структурной схемы приемопередатчика. Замечаем, что в приемопередатчике с многоканальным при-

емником уровень мощности передачи ($P = 3,3$ Вт) позволяет пересмотреть его элементную базу.

Рассмотрим вариант структурной схемы приемопередатчика (рис. 1.5), в которой передатчик выполнен по схеме сложения мощностей отдельных маломощных генераторов. Каждый из них отдает в антенну мощность P/N и реализу-

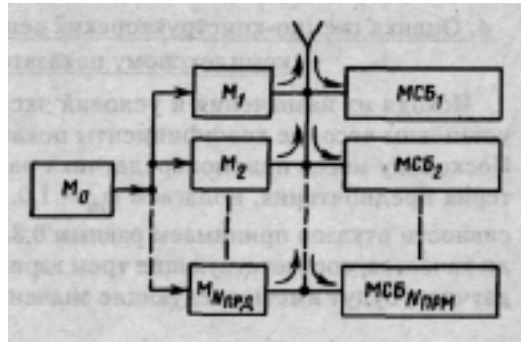


Рис. 1.5. Электрическая структурная схема приемопередатчика бортовой РЛС на микросборках СВЧ-модулей

ется в виде СВЧ-микросборки. Для построения передатчика выбираем микросборку типа СВЧ-модуля МЕРА. Выходная мощность модуля $P_M = 0,7$ Вт, удельный коэффициент мощности $k_p = 0,14$ кг/Вт.

Заданная мощность передатчика обеспечивается при количестве модулей $N_M = 3,3/0,7 = 4,8$. Однако, принимая во внимание неизбежные потери в схеме сложения и необходимость применения четного количества пар генераторов, полагаем $N_M = 8$.

При выбранных параметрах передатчика суммарная масса приемопередатчика составит

$$m_3 = k_{pM} \cdot P_M \cdot N_M + k_N N_{при} = 0,14 \cdot 0,7 \cdot 8 + 0,05 \cdot 30 = 2,26 \text{ кг.}$$

Следовательно, использование СВЧ-микросборок в передатчике позволяет получить дополнительный выигрыш в массе устройства.

Поскольку интенсивность отказов СВЧ МСБ равна 10^{-6} 1/ч, интенсивность отказов приемопередатчика

$$A_3 = 8 \cdot 10^{-6} + 30 \cdot 10^{-6} \approx 0,4 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ч,}$$

что значительно меньше допустимого значения.

Заметим, что выход из строя одного из каналов в приемнике или передатчике не ведет к нарушению работоспособности устройства в целом. Поэтому фактическая надежность многоканального приемопередатчика, оцениваемая интенсивностью отказов, будет выше расчетной.

4. Оценка схемно-конструкторских решений приемопередатчика по комплексному показателю качества

Исходя из назначения и условий эксплуатации приемопередатчика установим весовые коэффициенты показателей качества конструкции. Поскольку масса приемопередатчика рассматривалась в качестве критерия предпочтения, полагаем $\varphi_T = 1,0$. Весовой коэффициент интенсивности отказов принимаем равным 0,8. Тогда комплексные показатели качества, соответствующие трем вариантам построения приемопередатчика, будут иметь следующие значения:

$$K_1 = j_m \frac{m_1}{m_{доп}} + j_\Lambda \frac{\Lambda_1}{\Lambda_{доп}} = 1 \cdot \frac{50,05}{5} + 0,8 \cdot \frac{1,04 \cdot 10^{-4}}{10^{-4}} = 10,8$$

$$K_1 = j_m \frac{m_2}{m_{доп}} + j_\Lambda \frac{\Lambda_2}{\Lambda_{доп}} = 1 \cdot \frac{3,15}{5} + 0,8 \cdot \frac{1,3 \cdot 10^{-4}}{10^{-4}} = 1,67$$

$$K_1 = j_m \frac{m_3}{m_{доп}} + j_\Lambda \frac{\Lambda_3}{\Lambda_{доп}} = 1 \cdot \frac{2,26}{5} + 0,8 \cdot \frac{0,4 \cdot 10^{-4}}{10^{-4}} = 0,77$$

Ввиду того что уменьшение суммарной массы m и интенсивности отказов Λ приемопередатчика способствует повышению его качества, лучший вариант определяется по меньшему значению комплексного показателя. Таким образом, выбирается третий вариант приемопередатчика.

1.3. Ограничения на показатели качества конструкций РЭС

Часть показателей качества по тем или иным причинам может быть переведена в состав ограничений. Каковы же эти причины и какие из показателей качества чаще всего могут попасть в группу ограничений? Рассмотрим некоторые примеры конструкций РЭС разного уровня иерархии системы, начиная с верхнего.

Уровень 5 д — составляющие подсистемы самолета. К ним относятся планер, двигатель, топливо, полезная нагрузка и бортовое радио- и электрооборудование (РЭО). Масса самолета состоит из суммы масс его составляющих, т.е. $m_{сам} = m_{пл} + m_{дв} + m_m + m_n + m_{рэо}$. Разделив обе части уравнения на массу самолета, получим так называемое «уравнение существования самолета»: $1 = \mu_{пл} + \mu_{дв} + \mu_m + \mu_n + \mu_{рэо}$, где $\mu_i = m_i / m_{сам}$ — составляющая масса самолета.

В табл. 1.2 по зарубежным и отечественным [8] рекламным данным приведены технические характеристики и доли составляющих массы условных тяжелого, среднего и легкого самолетов.

Таблица 1.2

Технические характеристики самолета	Тип самолета		
	тяжелый	средний	легкий
Взлетный вес (масса), т	160	ПО	18
Дальность полета, тыс. км	18	3	12
Крейсерская скорость, км/ч	890	850	2450
Тяга, т (на 1 двигатель)	8,7	10,5	7,0
Расход топлива, кг/ (кг тяги • ч)	0,75	0,7	0,95
Число двигателей	2... 4	2...3	1 ...2
Масса планера/ взлетная масса	0,35	0,5	0,25
Масса двигателя/взлетная масса	0,1	0,1	0,15
Масса топлива/взлетная масса	0,45	0,25	0,20
Масса нагрузки/ взлетная масса	0,05	0,15	0,25
Масса РЭО/взлетная масса	0,05	0,01	0,15

По приведенным данным можно определить в конкретных случаях допустимые массы на РЭО, при которых для самолетов существует возможность подняться в воздух. Любое перераспределение масс составляющих самолета может быть пересчитано в изменения его технических характеристик с помощью формул, приведенных в [8].

Уровень $S_{3\pi}$ — антенное устройство РЛС самолета. Размещение антенны зеркального типа (вращающегося параболоида) в носу самолета определяется ее средним сечением (миделем), а следовательно, определяет ее площадь раскрыва $S_A = \pi D^2 / 4$ или диаметр раскрыва D .

Ометаемый объем «зеркала» равен $V_3 = 0,25D$. Мощность излучения $P_{изл}$ антенны прямо пропорциональна площади раскрыва, а максимальная дальность обнаружения цели

$$R = \sqrt[4]{P_{изл} G^2 I_s / (4\rho)^3 P_{min}}$$

где $P_{изл}$, P_{min} — мощности излучаемого и принимаемого сигналов; G — коэффициент усиления антенны; λ — длина волны; σ — «эффективная площадь» цели.

Таким образом, при заданном тактическом показателе R_{\max} объем, занимаемый антенной, должен иметь ограничение «не менее», что не всегда возможно. И в этом случае на помощь приходит микроэлектроника, а именно: применение плоской антенной фазированной решетки (АФР) с $V_{\text{АФР}} = (0,01... 0,04) D^3$ или получение в 6...25 раз меньшего объема по сравнению с зеркальным типом. Такой значительный выигрыш можно использовать следующим образом: АФР может быть отодвинута ближе к кабине летчика, так как освобождается место от двигателя, редуктора и карданной системы параболической антенны, при этом площадь ее раскрыва увеличивается, мощность — также увеличивается, и в конечном итоге увеличивается максимальная дальность обнаружения.

Уровень S_2 — блок цифрового вычислителя самолета. Будем считать, что блок сконструирован на бескорпусных МСБ с объемом 5 дм^3 и рассеивает за счет конвекции и излучения 50 Вт. На рис. 1.6 при-

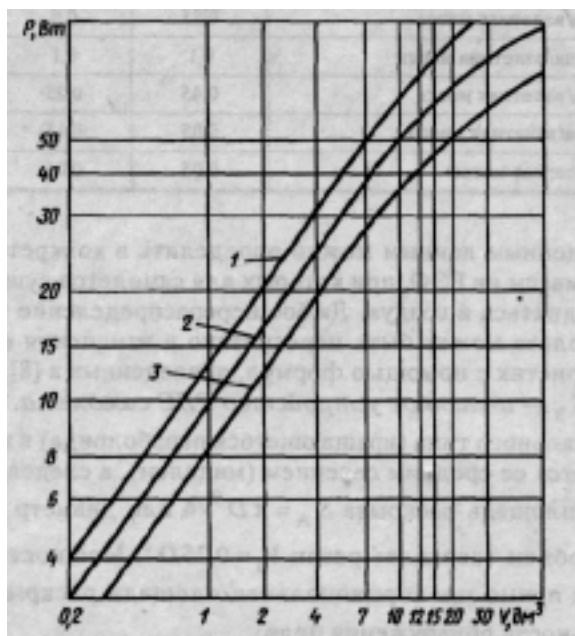


Рис. 1.6. Зависимости допустимой мощности рассеяния блока IV поколения от объема корпуса и условий теплопередачи:
 1 — излучение и естественная конвекция;
 2 — излучение и обдув воздуха вокруг корпуса ($V = 0,1 \text{ м/с}$);
 3 — только излучение

ведены ориентировочные зависимости допустимой мощности рассеяния блока IV поколения при температуре среды +60°C и перегреве корпуса относительно среды на 20°C от объема корпуса и условий теплопередачи. Как видно из графика, для заданных условий (кривая 1) такую мощность рассеивает блок с объемом не менее 7 дм³. В общем случае можно считать, что причиной ограничения объема блока является допустимая тепловая напряженность, т.е.

$$V_{\text{доп}} \geq P_{\text{расс}} / P_{\text{уд,расс,доп}}$$

Уровень S_1 - субблок (микросборка) приемоусилительного тракта. В работе [9] показано, что уменьшение размеров усилительной МСБ в k_1 раз приводит вначале к увеличению паразитных емкостей

($C_{\text{пар к}} / C_{\text{пар 0}}$; $C_{\text{пар к}} / C_{\text{пар 0}}$) паразитные емкости между проводниками

микросборки в первоначальном варианте, в варианте с уменьшенными размерами соответственно) и уменьшению устойчивой работы схемы до значения $k_1 = 2,36$, а далее

происходит обратное (рис. 1.7). Практический вывод из этого: при высоте корпуса МСБ, равной 7...10 мм, уменьшение ее линейных размеров в 2—4 раза крайне нежелательно, так как устойчивость усиления ухудшается в 7 раз, поэтому рекомендуемое уменьшение должно быть не менее, чем в 8...10 раз. Иными словами, имеем ограничение на массогабаритные показатели МСБ для обеспечения их устойчивой работы. Более конкретно это означает, что возможен переход от МСБ к минимикросборкам (разд. 3.10) или линейным интегральным схемам в виде кристаллов.

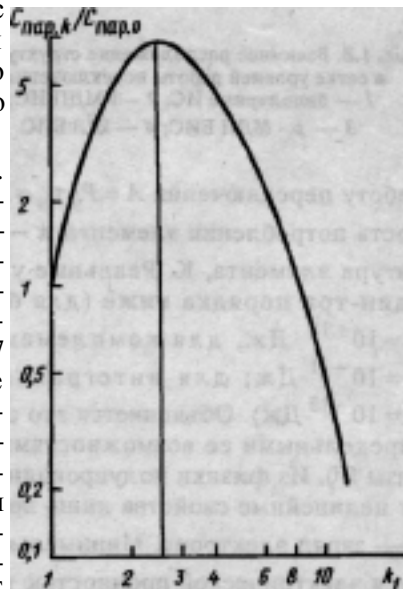


Рис. 1.7. Зависимость относительного изменения паразитных емкостей МСБ от относительного

Уровень S_0 — логические ИС,

полупроводниковые генераторы крайне высоких частот.

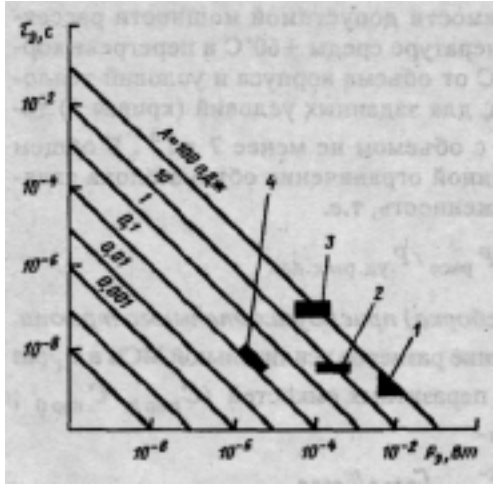


Рис. 1.8. Взаимное расположение структур ИС в сетке уровней работы переключения:
 1 — биполярные ИС; 2 — КМДП ИС;
 3 — p-МДП ИС; 4 — И²Л ИС

1. *Логические ИС.* От их быстродействия и задержек сигнала в линиях связи (ориентировочно 0,1 нс на 1 см проводника) в сильной степени зависят быстродействие и производительность бортовых и наземных ЭВМ. С ростом миниатюризации конструкций ФЯ и увеличением плотности монтажа в МСБ задержки сигналов становятся все более сравнимы с временем переключения единичного логического элемента τ_s . Выясним, от чего зависит это время и чем оно ограничивается. Во-первых, для полупроводниковых приборов существует теоретический предел на

работу переключения $A = P_s \tau_s = k T_e \ln 2 = 2 \cdot 10^{-14}$ Дж, где P_s — мощность потребления элемента; k — постоянная Больцмана; T_e — температура элемента, К. Реальные уровни этого показателя (рис. 1.8) на один-три порядка ниже (для биполярных транзисторных ключей $A = 10^{-10}$ Дж, для комплементарных МДП-структур (КМДП) $A = 10^{-11}$ Дж; для интегральной инжекционной логики (И²Л) $A = 10^{-13}$ Дж). Объясняется это существующими уровнями технологии (предельными ее возможностями в получении минимальной ширины базы W). Из физики полупроводников известно, что p — n переход имеет нелинейные свойства лишь при напряжении $U_{зб} = k T_e / e > 1$ В, где e — заряд электрона. Минимально возможная ширина базы определяется электрической прочностью полупроводника ($E = 10^6$ В/см), тогда $W_{min} = U_{зб} / E_{пр} = 10^{-6}$ см = 0,01 мкм. В этом случае максимальное быстродействие, т.е. минимальное время переключения $\tau_s = W/v_m = 10^{-12}$ с = 1 пс, где v_m — максимальная дрейфовая скорость носителей, равная 10^6 см/с. Таким образом, предельная величина времени переключения равна 1 пс, а для рассматриваемых структур она на три-четыре порядка выше (для биполярных 1 нс, для КМДП — 10 нс, И²Л —

50 не) из-за наличия технологического барьера (ширина базы p - n -перехода в настоящее время измеряется единицами микрометров).

2. *Полупроводниковые генераторы крайне высоких частот* (КВЧ). Существующие в настоящее время генераторы СВЧ на полупроводниковых приборах имеют незначительный КПД. Например, для лавинно-пролетных диодов (ЛПД) на кремнии он равен 5...10%, а на арсениде галлия — 20...30%. Такие низкие значения КПД объясняются следующим. Для каждого класса генераторов (на электровакуумных или полупроводниковых приборах) существует своя, так называемая физико-технологическая, постоянная, т.е. физический предел $\alpha = P \cdot f^2$, где P — генерируемая мощность, f — рабочая частота. Чем выше частота, тем меньше генерируемая мощность и тем меньше КПД. Причем поскольку наибольшее влияние на эту постоянную оказывает скорость V_m движения носителей заряда ($V_{m \text{ ЭВП}} = 3 \cdot 10^{10}$ мм/с и $v_{m \text{ ПП}} = 10^7$ мм/с) наряду с диэлектрической постоянной и напряженностью электрического поля, то и генерируемая мощность на одной и той же рабочей частоте для полупроводниковых приборов будет меньше этой величины на три порядка.

Таким образом, при конструировании генераторов миллиметрового диапазона волн следует считаться с этим ограничением по мощности. Конкретно это выражается в том, что один мощный передатчик, например на лампе бегущей волны или магнетроне, может быть заменен в миниатюрных конструкциях на тысячу полупроводниковых генераторов со сложением мощностей в общей нагрузке: либо сложением мощностей при параллельной работе N генераторов на общие шины нагрузки, либо сложением их мощности на тройниках. Первый способ из-за трудности согласования генераторов с нагрузкой на СВЧ не применяется, так как число работающих параллельных генераторов ограничено: $N \leq 10$. В тройнике (делителе мощности, гибридном мосте) обеспечиваются равенство волновых сопротивлений в его плечах и достаточная развязка между ними (порядка 30 дБ). Число тройников, нужных для сложения мощностей N генераторов, рассчитывается по формуле $n_m = \lg_2 N$, а суммарный коэффициент передачи по мощности по формуле $K_{p\Sigma} = K_p^{n_m}$,

где K_p — коэффициент передачи по мощности одного тройника*. Поэтому если имеется, например, 1024 генератора

* Высоцкий Б.Ф., Войнич Б.А. Элементы инженерного расчета микроэлектронных радиолокационных устройств. — М.: МАИ, 1971.

миллиметрового диапазона с выходной мощностью $P = 0,2 \text{ Вт}$ каждый, то потребуется число тройников $n_T = \lg_2 1024 = 10$, а суммарный коэффициент передачи при $K_p = 0,96$ будет равен $K_{p\Sigma} = 0,66$. На выходе получим суммарную мощность $P_\Sigma = 0,2 \cdot 1024 \cdot 0,66 = 135 \text{ Вт}$, т.е. примерно треть мощности теряется в тройниках. Поэтому число генераторов и тройников следует выбирать из условия получения достаточного коэффициента (например, порядка 0,8) и возможности размещения определенного числа генераторов в одной плоскости с микрополосковыми тройниками. Так, при $\lambda_c = 10 \text{ мм}$ на поликоровой подложке размером 48x48 мм возможно разместить 64 излучателя АФР при $n_m = 6$ и $K_{p\Sigma} = 0,783$, что вполне приемлемо как по площади и энергетике, так и по технологии изготовления, при условии, что базовая пластина для напыления ограничена размерами 48x60 мм.

1.4. Правила и принципы микроэлектронного конструирования РЭС

Правила и принципы микроэлектронного конструирования РЭС, естественно, включают в себя все общие правила и принципы, характерные для РЭС в целом. Однако они имеют ряд особенностей. Перечислим основные правила микроэлектронного конструирования РЭС [2]:

- невозможно создать новый экономически приемлемый и работоспособный вариант микроэлектронной конструкции, не пересмотрев электрическую принципиальную схему прототипа;

- использование электрической принципиальной схемы обычного РЭС в микроэлектронном варианте с новой элементной базой практически полностью исключается: в лучшем случае в основу его разработки может быть положена электрическая функциональная схема, в остальных — только требования ТЗ;

- при конструировании микроэлектронных средств должен быть использован принципиально новый подход к проектированию структуры РЭС;

- использование ИС возможно большей степени интеграции для повышения надежности и уменьшения массы, габаритов и стоимости РЭС;

- применение в конструкциях аналоговых устройств и субблоков навесных компонентов, по форме совместимых с пленарными конструкциями ИС, для уменьшения дезинтеграции по массе и объему;

- замена функциональных узлов из дискретных ЭРЭ на аналоги интегральной и функциональной электроники (см. табл. В.2).

Наглядный пример выполнения первых трех правил был приведен в разд. 1.2 при оптимизации конструкции бортовой РЛС. Выполнение четвертого правила подтверждается всем ходом развития микроэлектроники, а именно: появлением и внедрением в конструкции РЭС интегральных схем с числом элементов до 10^6 вентилях на кристалл. При этом надежность и стоимость БИС и СБИС в условиях эксплуатации и их массового производства незначительно отличаются от этих показателей ИС средней и малой степени интеграции, а массы и габариты РЭС, построенных на них, в отличие от прототипов уменьшаются почти на порядок, так как высокая интеграция позволяет все элементы, компоненты и монтаж, ранее находящиеся на платах и подложках, разместить на одном кристалле БИС. Уместно все же заметить, что и для БИС существует предел интеграции, обусловленный тем, что с увеличением числа элементов в кристалле резко возрастает та часть его площади, которая отводится на межсоединения и периферийные выводы

от него, т.е. $S_M = \frac{4}{3} N^{4/3} h_T$, где N —число элементов; h_T — шаг

трассы межсоединений, зависящий от уровня развития полупроводниковой технологии [9]. Кроме того, с увеличением площади кристалла уменьшается процент выхода годных ИС; например, при увеличении стороны кристалла цифровых ИС с 4 до 10 мм процент выхода годных падает с 12...15% до 4...5%.

Эффективность выполнения пятого правила может быть показана на примере замены каркасной катушки индуктивности мегагерцевого диапазона волн на интегральные пьезоэлектрические фильтры в корпусе 115.15-3 с размерами 19,5x14,5x3,2 мм в условной линейке усилителя промежуточной частоты (УПЧ), конструктивно выполненной в виде пенальной формы экранированного субблока (рис. 1.9). Примем, что минимально возможный внешний диаметр каркаса катушки индуктивности $D=5\text{мм}$ (при меньшем значении без сердечника будет очень низкая добротность). Для получения максимально возможной добротности катушки должно соблюдаться отношение $l/D = 1$, где l —длина намотки провода; для того чтобы экран не вносил потери более чем 20% и не приводил к расстройке контура, расстояния h , от края намотки до экранов (сверху и снизу) должны быть не менее половины диаметра катушки. Тогда минимальная высота катушки равна $h_{K\text{min}} = l + 2h, = D + D = 10\text{мм}$. Примем также, что в обоих вариантах толщина стенок корпуса $\Delta_K = 0,5\text{мм}$, толщина печатной платы $\Delta_{\text{пч}} = 1\text{мм}$, а величина зазоров между компонентами $\Delta = 3\text{мм}$. Будем

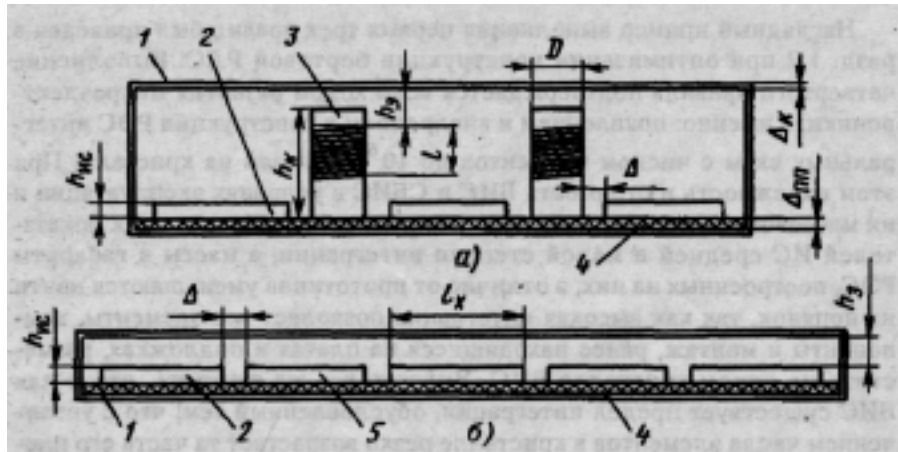


Рис. 1.9. Конструкции условной линейки УПЧ: а — с каркасными катушками индуктивности; б — на фильтрах ПАВ; 1 — каркас (экран); 2 — корпусированная микросхема; 3 — каркасная катушка индуктивности; 4 — печатная плата; 5 — фильтр ПАВ

считать, что линейка в обоих вариантах имеет лишь один ряд компонентов (микросхем, катушек и фильтров), и ее ширина по габаритам корпуса равна $B = 20 \text{ мм} = \text{const}$. Высота корпуса в первом варианте составит $H_1 = 2 \Delta_k + \Delta_{пп} + h_{к \text{ min}} = 12 \text{ мм}$, а во втором варианте $H_2 = 2 \Delta_k + \Delta_{пп} + \Delta_{ис} + \Delta_3 = 6,5 \text{ мм}$, где $\Delta_{ис}$ — высота корпуса ИС, Δ_3 — зазор между корпусом ИС и внутренней поверхностью стенки корпуса субблока, равный 1,3 мм. Рассчитаем по схеме рисунка для обоих вариантов длины корпусов субблока:

$$A_1 = 3l_x + 6 \Delta + 2 \Delta_k + 2D = 77,5 \text{ мм};$$

$A_2 = 5l_x + 6 \Delta + 2 \Delta_k = 97,5 \text{ мм}$, где $l_x = 19,5 \text{ мм}$. Далее определим объемы конструкций для этих вариантов $V_1 = A_1 \cdot B \cdot H_1 = 18,6 \text{ см}^3$, $V_2 = A_2 \cdot B \cdot H_2 = 12,7 \text{ см}^3$. Выигрыш в объеме за счет замены катушек на пьезофильтры составит $B_v = V_1 / V_2 = 1,5$. Итак, мы получили такой выигрыш только в случае замены двух катушек на два фильтра и лишь для одного канала усилительного тракта. Нетрудно подсчитать, во сколько увеличится этот выигрыш для многоканального тракта и с большим числом каскадов усиления.

К основным принципам микроэлектронного конструирования РЭС относятся комплексная миниатюризация, мультиплексирование, многоканальность, цифровизация.

1.5. Комплексная миниатюризация и мультиплексирование РЭС

Под комплексной миниатюризацией в широком смысле понимают системный подход к применению в радиоустройствах всех средств микроэлектроники, включающий внедрение новых принципов создания интегральных радиоэлектронных устройств на базе СБИС и новых разработок математического и аппаратного обеспечения для автоматизированных систем проектирования, конструирования, изготовления и контроля [10]. В более узком понимании комплексная миниатюризация — это применение новой элементной базы и новых методов конструирования для всех устройств комплекса с целью выравнивания основных качественных показателей этих устройств и приближения их к максимальным.

Итак, во-первых, надо провести миниатюризацию устройств, причем не просто уменьшить геометрические размеры, а получить сверхминиатюрные надежные изделия относительно небольшой стоимости на базе микроэлектронных методов изготовления. Такой способ миниатюризации иногда называют микроминиатюризацией. Во-вторых, миниатюризация должна быть комплексной, т.е. ни одно из устройств не должно выпадать из всей совокупности устройств комплекса по основному критерию предпочтения, например по массе или интенсивности отказов. Представим себе, что из нескольких устройств бортового комплекса, например антенны, передатчика, приемника, индикатора, блока питания, по массе (или интенсивности отказов) резко выделяется один, например блок питания на дискретных элементах. Тогда, какую бы миниатюризацию в других устройствах мы не проводили (применение АФР, многоканального передатчика на ИС, микроэлектронных приемника и индикатора), все равно масса и надежность комплекса устройств будут определяться именно этим блоком. При первом же отказе блока питания все устройства окажутся неработоспособными, а его масса и габариты будут значительно больше, чем эти характеристики остальных миниатюрных конструкций. Поэтому, внедряя микроэлектронику и новые методы компоновки, нельзя забывать ни об одном из устройств, т.е. решать все вопросы в комплексе. Пример такого решения показан в разд. 1.2. В-третьих, при комплексной миниатюризации надо стремиться к достижению самых высоких результатов. Поэтому одной из рекомендаций комплексной миниатюризации является то, что следует выбирать элементную базу из таких изделий электронной техники, физико-технические характеристики которых пока еще далеки от теоретического предела, но развиваются в сторону его достижения, а достигнутый уровень уже позволяет начать их применение. Разработка новой

элементной базы, например в технике СВЧ, должна проводиться параллельно с разработкой конструкции самого устройства. Конечным результатом внедрения комплексной миниатюризации при конструировании РЭС высокой интеграции должно быть наибольшее приближение к идеальному конструктиву, обладающему максимальными информативными параметрами при минимальных материальных затратах на его воплощение. Например, известно, что скорость передачи информации обратно пропорциональна кубическому корню из объема конструкции: чем меньше объем, тем короче длины линий передачи информации, тем больше скорость. Поэтому только высокая интеграция ИС, наряду с функциональной электроникой может приблизить нас к идеальным конструктивам.

Принцип мультиплексирования заключается в схемотехническом и конструктивном уплотнении каналов обмена информацией и является одной из разновидностей общего принципа комплексирования устройств.



Рис. 1.10. Варианты передачи информации между блоками: а — набором проводниковых линий связи; б — мультиплексной линией

Рассмотрим возможности применения принципа мультиплексирования на следующем примере. Пусть имеются два бортовых радиоэлектронных устройства *A* и *B* с цифровой обработкой сигналов. Передача информации из блока *A* в блок *B* в первом варианте (рис. 1.10, а) осуществляется с помощью набора проводниковых линий связи, длина каждой из которых равна *l*, а само количество линий равно *M*. Известны

также погонная масса одной линии связи δ , частоты отказов проводника $\lambda_{пр}$ и мест их присоединений, например пайкой ($\lambda_{пр}$). Во втором варианте (рис. 1.10, б) присутствует лишь одна мультиплексная линия связи, начинающаяся с входного мультиплексирующего устройства 1 (шифратора или кодера информации) и заканчивающаяся мультиплексирующим устройством 2 (дешифратором или декодером). Оценим для этих двух вариантов главные показатели бортовых устройств — массу и интенсивность отказов:

$$m_a = Ml\delta, A_a = 2M\lambda_n + M\lambda_{пр} = M(2\lambda_n + \lambda_{пр}),$$

$$m_\sigma = l\delta + 2m_{му}, A_\sigma = 2\lambda_n + \lambda_{пр} + 2\lambda_{му}$$

Сравнивая массы и интенсивности отказов линий, видим, что при условии $m_{\text{МУ}} \ll m_{\text{А}}, \lambda_{\text{МУ}} \ll \lambda_{\text{А}}, \lambda_{\text{ПР}}$ второй вариант дает выигрыш в массе и надежности примерно в M раз. Возникает вопрос: почему этот принцип, известный ранее, не применялся в конструкциях прошлых лет. Ответ может быть следующим: при конструировании мультиплексирующих устройств на дискретных ЭРЭ их масса и объем были сравнимы с массой и объемом самих устройств A и B , а надежность была во много раз хуже надежности провода и его мест пайки.

При микроэлектронном конструировании масса отдельных МСБ - может быть порядка единиц-десятков граммов, а надежность их может быть равна или выше надежности провода и паек, так как $\lambda_{\text{ис}} = \lambda_{\text{МСБ}} = 10^{-6}$ 1/ч. Масса же кабельной сети (без мультиплексирования) обычно составляет до 30% от массы коммутирующих блоков при числе линий связи в десятки-сотни проводников. Оценим, хотя бы ориентировочно, выигрыш в массе при мультиплексировании. Пусть масса блоков A и B составляет 10 кг, тогда масса кабельной сети будет примерно равна 3 кг; в сумме получим 13 кг. Во втором варианте остаются массы блоков A и B (10 кг), масса одной линии связи (примем, что $M = 100$), равная 30 г, и масса кодера и декодера, равная 50 г; итого 10,08 кг. Тогда выигрыш в массе $B_m = 13/10,08 = 1,3$ раза или на 30% больше, чем первоначальное значение. Если массу блоков A и B увеличить в два и более раз, то выигрыш практически не изменится, так как происходит лишь исключение (правда не полное, но значительное) массы самой кабельной сети, которая и составляет эти 30%. Выигрывая в массе и надежности при использовании принципа мультиплексирования, мы проигрываем в быстродействии передачи информации, так как информация идет последовательно одна за другой по одному каналу.

1.6. Многоканальность и цифровизация в конструкциях РЭС

Принцип многоканальности появился впервые в радиотелеметрических системах в связи с большим количеством информации, которую надо было передать за очень короткое время. В настоящее время радиотелеметрические системы могут содержать до 4096 (2^{12}) каналов, а продолжительность радиосеансов связи с искусственными спутниками Земли составляет лишь 10...15 мин в пределах прямой видимости и примерно 30 мин для космических летательных аппаратов (в них время ограничено запасами энергии солнечных батарей, которую они могут выделить на этот сеанс).

Развитие этого принципа продолжалось в обычных радиотехнических средствах, особенно в авиационных, когда стали появляться многоканальные конструкции с «горячим» или «холодным» резервированием для повышения надежности все более усложняющихся устройств. Третьей причиной появления многоканальных конструкций явилось появление в бортовых и наземных комплексах РЛС антенных фазированных решеток, питание которых осуществлялось по способу «один канал — один излучатель» либо фидерным способом «разветвление елочкой». Это позволило создавать многофункциональные РЛС для обнаружения и одновременного сопровождения целей, надежность таких систем была увеличена на один-два порядка по сравнению с одноканальными. Выигрыши были получены и в массогабаритных показателях при переходе к транзисторам и особенно к микроэлектронным узлам (разд. 1.2).

Наконец, в настоящее время этот принцип внедряется при создании ЭВМ с развитой параллельной архитектурой, построенной на транспьютерных микросистемах. Производительность таких ЭВМ может достигать 10 млрд. опер/с при потребляемой мощности всего в 3...5 Вт, так как тактовая частота благодаря параллельности вычислений может быть сравнительно низкой (≈ 10 МГц).

Таким образом, применение принципа многоканальности при современном уровне элементной базы и методов конструирования позволяет значительно уменьшить массогабаритные характеристики конструкций, повысить их надежность и производительность, а также ввести унификацию МСБ и полупроводниковых устройств.

Цифровизация РЭС основана на том, что цифровые схемы менее критичны к разбросу производственных погрешностей ИС и их нестабильности в условиях эксплуатации, так как работают по принципу «да — нет». Устойчивые положения этих схем определяются уровнями напряжений, соответствующих логическим нулю и единице. Однако цифровые схемы содержат большее количество комплектующих элементов, чем аналоговые. Развитие БИС и СБИС в некоторой степени устраняет этот недостаток. Поэтому в современных конструкциях РЭС все чаще появляются встроенные цифровые блоки, в особенности на микропроцессорных устройствах. Эти блоки решают такие задачи, как обнаружение и захват сигнала по частоте, цифровая фильтрация, спектральный анализ, корреляционная обработка, выделение исходного цифрового кода из псевдощумовой последовательности сигналов, управление лучом ФАР бортовой РЛС и др. [11]. Применение цифровых устройств на базе БИС и СБИС позволяет получить при приемлемых массогабаритных показателях конструкций более надежные, точные и

быстродействующие системы автоматического управления другими блоками бортовых комплексов РЭС.

2. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС

2.1. Специализация конструкторских организаций

Определенные этапы разработки новых РЭС производятся в разных проектно-конструкторских организациях

Головной проектный институт осуществляет выбор основных направлений и разработку перспективных планов комплексных разработок.

Научно-исследовательский институт (НИИ) создает изделия принципиально новой конструкции на базе специальных теоретико-экспериментальных исследований. Разработки доводятся до изготовления опытного образца.

Научно-исследовательский и проектно-технологический институты создают принципиально новые технологические процессы и производят модернизацию существующих.

Специальное (особое, центральное) конструкторское бюро осуществляет создание новых изделий на базе имеющихся теоретико-экспериментальных исследований и модернизацию существующих; разрабатывает автоматические линии; работает над вопросами стандартизации, повышения надежности и долговечности изделий.

Исследовательские проблемные лаборатории и КБ вузов работают над созданием принципиально новой техники и модернизацией существующей; решают вопросы по увеличению надежности.

Проектно-конструкторские подразделения промышленных предприятий осуществляют создание и модернизацию техники, работающей на предприятии; производят оснащение производства новыми видами нестандартного оборудования, приспособлениями, инструментом.

Проектно-конструкторские организации специализируются на разработке ограниченного числа типов и номенклатуры РЭС. В зависимости от степени сложности изделия различают предметную, поддетальную и технологическую специализации проектно-конструкторских организаций.

Предметная специализация направлена на разработку определенного типа продукции; в этом случае номенклатура разрабатываемой продукции максимально сокращена. Организация выполняет весь объем (комплекс) работ по выполнению документации данного изделия (групп изделий).

При *подетальной* специализации разрабатываемая конструкция разукрупняется на ряд составляющих блоков, узлов, деталей, за которыми закрепляется разработчик и выполняет для них всю конструкторскую документацию (КД). Предоставляется возможность сбора информации по самым детальным вопросам проекта; возможна узкая специализация разработчиков; появляется возможность применения унифицированных конструкций в разработках. Однако при этом затрудняется разработка общей компоновки и согласование отдельных частей проекта, тем самым удлиняется цикл подготовки производства.

При *технологической* специализации разделение труда производится по характеру выполняемой изделием функции или технологическому признаку. Специализация осуществляется по отдельным технологическим частям разработки, которые выделяются в отдельное производство. Технологическая специализация является основным признаком отрасли. Особенности изделий данной отрасли должны быть учтены при конструкторской подготовке производства, поэтому конструктор является специалистом той отрасли, в которой он работает.

Создание РЭС представляет собой процесс, в котором принимают участие коллективы специалистов различного профиля. Обычно в разработке новых РЭС принимают участие заказчик, разработчик, изготовитель и потребитель.

Заказчиком является организация, которая заказывает изделие, представляет разработчикам исходные требования к изделию, подлежащему разработке, обеспечивает полное его использование, осуществляет с разработчиком приемку опытного образца, определяет объем продукции.

Разработчиком является организация, которая реализует требования заказчика в виде конструкторско-технологической документации на серийное производство. В обязанности разработчика входят: разработка ТЗ и необходимой технической документации; выявление новых технических решений; проведение приемочных испытаний опытного образца; осуществление авторского надзора при освоении и производстве изделий.

Изготовителем является предприятие, которое обеспечивает освоение нового изделия в заданном объеме.

Потребителем является предприятие, которое отвечает за обоснованность предъявленных им требований к разрабатываемому изделию и обеспечивает надлежащие условия его применения.

Основные функции, выполняемые заказчиком, разработчиком, изготовителем и потребителем, устанавливаются ГОСТ 15.001-88.

2.2. Последовательность создания РЭС

Последовательность создания РЭС может быть представлена в виде схемы (рис. 2.1) с элементами, отражающими как деятельность коллективов НИИ, промежуточных предприятий и испытательных организаций, так и результат этой деятельности в виде изготовленных образцов изделий и их различных моделей (физических, математических).

Как видно из этой схемы, процесс создания системы включает в себя этапы, на которых осуществляется построение и преобразование ее моделей [12], а также прямой и обратный переходы от моделей к реальным образцам системы S и ее элементам S_k . Так, начальная неформализованная модель M_0 будущей системы S представляет собой словесное описание целей и задач, которые ставятся перед системой при принятии решения на ее создание. В дальнейшем при разработке тактико-технических требований (ТТТ) на вновь создаваемую систему S , исходя из целей, для достижения которых

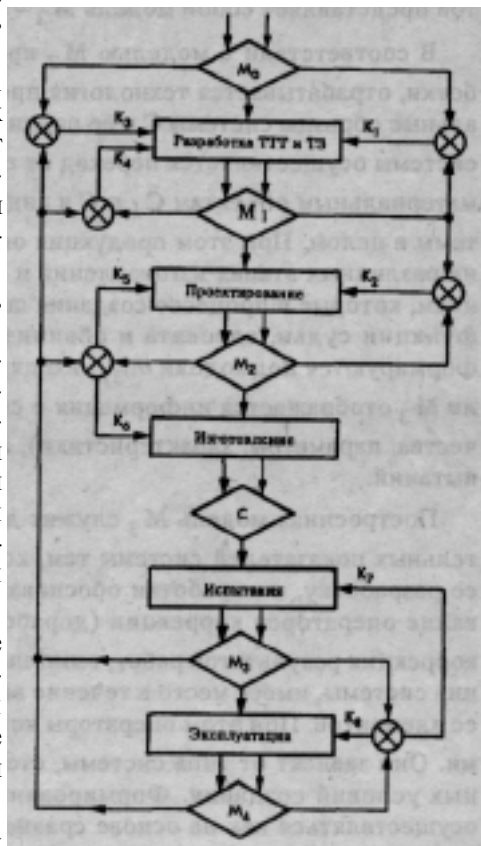


Рис. 2.1. Последовательность создания РЭС

предназначается система, и уровня развития теории и практики создания подобных систем, формируется первая формализуемая модель M_j будущей системы S . Эта модель M_1 включает в себя множество требуемых характеристик и показателей качества $M_1 = \{m_{ij}\}$, которые должна иметь система при использовании по назначению.

Модель M_{1j} является исходной для задания на проектирование системы S и ее подсистемы S_k . Результаты проектирования системы —

это эскизный и технический проекты M_{2j} , в которых отражается предполагаемая техническая реализация и возможные варианты воплощения различных свойств, структуры и параметров. Совокупность проектов представляет собой модель $M_2 = \{m_{2j}\}$

В соответствии с моделью M_2 проводятся конструкторские разработки, отрабатывается технология производства и изготавливаются реальные образцы системы S и ее подсистемы S_K . На этом этапе создания системы осуществляется переход от ее модели M_2 и подмоделей m_{2j} к материальным объектам S_k и S в виде узлов, блоков, подсистем и системы в целом. При этом продукция опытного и серийного производств на различных этапах изготовления и после него подвергается испытаниям, которые в процессе создания систем, образно говоря, исполняют функции судьи, адвоката и обвинителя. По результатам испытаний формируются подмодели m_{3j} , входящие в состав модели M_3 . В модели M_3 отображается информация о свойствах системы (показатели качества, параметры, характеристики), определенных по результатам испытаний.

Построенная модель M_3 служит для оценки соответствия действительных показателей системы тем, которые были выдвинуты в ТТТ на ее разработку, и выработки обоснованных рекомендаций на формирование операторов коррекции (доработок) K_l . Следует отметить, что

коррекция результатов работ, выполненных на различных этапах создания системы, имеет место в течение всего процесса создания системы и ее элементов. При этом операторы коррекции K_l могут быть различными. Они зависят от типа системы, степени ее совершенства и конкретных условий создания. Формирование операторов коррекции может осуществляться как на основе сравнения результатов расчета или моделирования с заданием на разработку модели, так и на основе сравнения обработанных результатов реальной системы с ранее построенными моделями. В первом случае уточняются объекты системы M_1 и M_2 , во втором — совершенствуются материальные объекты в виде блоков и узлов S_K входящих в состав системы S .

В зависимости от конкретных условий и особенностей создания систем изображенная на рис. 2.1 схема может быть уточнена и дополнена. Однако независимо от степени детализации особый интерес представляют контуры обратных связей, характеризующих динамику создания РЭС.

2.3. Стадии разработки изделия

Стандартом ГОСТ 2.100-68 предусматриваются следующие стадии разработки: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект, разработка рабочей документации. Стадии разработки устанавливаются в зависимости от сложности разрабатываемого изделия и программы его выпуска.

Техническое задание — первичный основополагающий документ, которым руководствуются проектировщики, приступая к разработке нового изделия. Оно определяет основные направления разработки: конструкцию и принцип работы будущего изделия. ТЗ, с одной стороны, отражает потребности общества в новых изделиях, с другой — технические и технико-экономические характеристики будущего изделия.

ТЗ должно устанавливать следующие показатели разрабатываемого изделия: прогнозируемые показатели технического уровня и качества; основное назначение, технические и тактико-технические характеристики; уровень стандартизации и унификации; технико-экономические показатели; патентно-правовые показатели; специальные требования к изделию и др.

В ТЗ оговариваются этапы разработки и сроки выполнения каждого этапа и разработки в целом. Качество ТЗ обеспечивается объемом и полнотой сбора материалов, необходимых для разработки. При разработке используются следующие материалы: научно-техническая информация; патентная информация; характеристика производства, на котором изделие будет изготавливаться.

ТЗ может явиться результатом проведенного исполнителем этапа работ и составляться по окончании работ как отчетный документ. Примером могут служить НИР, исходным документом которых является ТЗ на выполнение опытно-конструкторских работ (ОКР).

Общий порядок разработки и утверждения ТЗ устанавливают заказчик и разработчик в соответствии с ГОСТ 15.001-88.

ТЗ оформляют в соответствии с общими требованиями к текстовой КД по ГОСТ 2.105-79 на листах формата А4 по ГОСТ 9327-60. К ТЗ прилагаются схемы и эскизы конструкции будущего изделия, а для технологических разработок — технологические данные и технико-экономические показатели существующего производства. ТЗ должно содержать максимум информации, облегчающей работу конструктора и сокращающей сроки разработки.

Начальным этапом комплекса работ по созданию, освоению и внедрению новой техники является научно-исследовательская работа (НИР). Она проводится в случае, когда разработку РЭС невозможно или неце-

лесообразно осуществлять без проведения соответствующих исследований. НИР проводят с целью получения основных исходных данных для разработки ТЗ на новую модернизированную аппаратуру. Требования к НИР определяются ГОСТ 15.001-80 и проводятся поэтапно.

Первый этап — разработка ТЗ. Этот документ является исходным и определяет цель, содержание, порядок проведения работ, а также намеченный способ реализации результатов НИР. В общем случае ТЗ на НИР должно состоять из следующих разделов: основание для проведения НИР, цель и исходные данные для проведения НИР, этапы НИР, основные требования к выполнению НИР, способ реализации НИР, перечень технических документов, предъявляемых по окончании НИР, порядок рассмотрения и приемки НИР, технико-экономические обоснования НИР, приложения.

Второй этап — выбор направления исследования. Идет сбор и изучение научно-технической литературы, научно-технической документации (НТД) об аналогах и других материалов, относящихся к разрабатываемой теме. Проводятся эксперименты, рассматриваются результаты эксплуатации аналогов. На этом этапе проводят патентные исследования и составление тематического обзора.

Третий этап — теоретические и экспериментальные исследования. Проводится разработка рабочих гипотез построения моделей объекта исследований, обоснование допущений. Разрабатывается методика экспериментальных исследований, подготавливаются модели, испытательное оборудование. Сопоставляются теоретические и экспериментальные данные. При необходимости составляется промежуточный отчет.

Четвертый этап — обобщение и оценка результатов исследований. Обобщаются результаты предыдущих этапов работы. Формулируются технические требования для ТЗ на проведение ОКР. Составляется и оформляется отчет. Рассматриваются результаты проведения НИР и производится приемка работы в целом. При положительных результатах НИР проводится комплекс работ по разработке конструкций РЭС (ОКР).

Проведение ОКР регламентируется ГОСТ 2.403-68. Работа осуществляется под единым техническим и научным руководством в двух взаимосвязанных направлениях: по электрической схеме и конструкции. Разработкой схем и принципа действия, включая макетирование и экспериментальную проверку электрических схем, заняты радиотехнические подразделения. Разработка конструкций, включая все исследования конструкции РЭС и составных частей, выполняется конструкторскими подразделениями. Исследования опытных образцов проводятся совместно.

В общем случае выполняются три проектные стадии: техническое предложение, эскизный проект, технический проект.

Техническое предложение разрабатывается с целью выявления дополнительных или уточнения существующих требований к изделию. Объем технического предложения определяется ТЗ, а требования к его выполнению устанавливает ГОСТ 2.118-73.

Техническое предложение — совокупность конструкторских документов, которые должны содержать технические и технико-экономические обоснования целесообразности разработки документации изделия на основании анализа ТЗ заказчика и различных вариантов возможных решений изделий.

При разработке технического предложения может обнаружиться, что для принятия окончательного варианта не хватает информации. В этом случае необходимо провести дополнительные исследования, которые могут носить теоретический или экспериментальный характер. Чаще всего они включают изготовление экспериментальных образцов или моделей.

Техническое предложение разрабатывается проектной организацией или НИИ и затем передается заказчику для дальнейшей проработки по установленному оптимальному варианту.

Эскизный проект разрабатывается в том случае, если это предусмотрено ТЗ или протоколом рассмотрения технического предложения. В эскизном проекте производится конструкторская проработка оптимального варианта до уровня принципиальных конструкторских решений, дающих общее представление об устройстве и принципах работы изделия. Требования к выполнению эскизного проекта устанавливает ГОСТ 2.119-73. На этой стадии закладываются основы применения типовых, стандартизированных и унифицированных составных частей разработки.

Эскизный проект - совокупность конструкторских документов, которые должны содержать принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия, а также назначение, основные параметры и габаритные размеры. В эскизном проекте подтверждаются или уточняются требования к изделию, установленные ТЗ и техническим предложением. На основе проводимых конструкторских проработок разрабатываются новые, уточненные технические требования и уточняются новые технические параметры. Рассчитываются необходимые технико-экономические показатели, которые заложены при разработке эскизного проекта.

Технический проект разрабатывается в том случае, если это предусмотрено ТЗ, протоколом рассмотрения технического предложения и эскизного проекта. Требования к выполнению технического проекта

устанавливает ГОСТ 2.120-73. В техническом проекте должны быть решены все вопросы, обеспечивающие технический уровень нового изделия как в процессе изготовления, сборки, испытания, так и в процессе эксплуатации. Проводится детальная и окончательная отработка схемных и конструктивных решений, включая создание чертежей на все важные узлы, блоки и приборы. Должна быть закончена проработка всех вопросов защиты от внешних воздействий, доступа при ремонте и контроле, привязка к объекту установки (носителю), уточнено расположение органов управления и т.п.

Технический проект — совокупность конструкторских документов, которые должны содержать окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия и включающие в себя данные, необходимые и достаточные для разработки рабочей КД. Номенклатуру КД технического проекта устанавливает ГОСТ 2.102-68. Обязательными документами являются чертеж общего вида, ведомость технического проекта и пояснительная записка.

Документам технического предложения присваивается литера «П»; эскизного проекта — «Э»; технического проекта — «Т».

На стадии *рабочего проектирования* решаются вопросы конструкторских и технологических разработок оригинальных деталей. Устраняются все замечания, выявленные при обсуждении и принятии технической документации предыдущих стадий проектирования.

Различают три стадии рабочего проектирования: стадию опытного образца, стадию установочной серии, стадию установившегося производства.

В пределах каждой стадии установлена определенная последовательность работ по этапам. На стадий *опытного образца* разрабатывают КД для изготовления опытного образца, на основании которой производят подготовку опытного производства, подготавливают опытный образец, проводят его заводские испытания. По результатам изготовления и испытаний производят корректировку КД с присвоением литеры «О». По откорректированной КД дорабатывают опытный образец до полного соответствия литере «О», после чего проводят приемочные испытания. Результаты приемочных испытаний фиксируются в протоколе, на основании которого производят корректировку КД с присвоением литеры «О₁». На основании КД с литерой «О₁» осуществляют подготовку серийного производства на заводе изготовителе.

На стадии *установочной серии* на серийном заводе изготавливают установочную серию изделий и подвергают их испытаниям для выявления недостатков, почему-либо оставшихся незамеченными в опытном образце или возникших в условиях производства на данном предприя-

тии. По протоколу испытаний производят корректировку КД с присвоением литеры «А» и передают подлинники КД на завод.

На *стадии установившегося производства* при изготовлении и испытании головной серии корректируют КД по результатам авторского надзора с учетом возможных отклонений по мере отработки технологического процесса и обеспечивающей его оснастки. По протоколу испытаний производят корректировку КД с присвоением литеры «Б», что дает право наладить серийное и массовое производство изделия. КД на изделие для разового изготовления присваивают литеру «И».

ный диапазон РЭС, источники помех, быстродействие и объем памяти вычислителей, состав всего изделия и возможности его конструктивного расчленения на функционально законченные устройства или блоки. Исходя из назначения, объекта установки, требований к материальным параметрам с помощью комплексного показателя качества обосновывается выбор направления конструирования (на печатных платах с корпусированными ИС и МСБ либо микросборочное бескорпусное конструирование), которое должно быть утверждено главным конструктором разработки. После выбора направления конструирования и анализа возможностей разбиения электрической схемы всего устройства на блоки необходимо определить, сколько содержится (или будет содержаться) в электрической принципиальной схеме каждого блока корпусированных ИС или бескорпусных МСБ; при этом надо учесть, что на площади 24х30 мм тонкопленочной подложки возможно разместить порядка 12 бескорпусных ИС.

Выбор элементной базы является одним из главных этапов обеспечения качества изделия. В ряде случаев этот выбор может быть сделан из широкого круга представленной номенклатуры элементов и осуществлен с помощью критерия предпочтения. В других случаях, в особенности в диапазоне КВЧ, этот выбор весьма узок, поэтому может случиться, что по электрическим параметрам активные элементы удовлетворяют разработчика, а по условиям работы — не удовлетворяют. Тогда конструктору предстоит обеспечить этим элементам нормальные условия функционирования за счет принятия соответствующих конструктивных решений, например улучшение теплоотвода от мощных транзисторов СВЧ введением брокеритовых вставок (разд. 3.5).

Анализ конструктивных аналогов и выбор прототипа выполняется с целью представления конструктору образа будущего изделия и выбора всего самого ценного из ранее сделанного в конструкции. В качестве конструкторских аналогов в соответствии с ГОСТ 2.116-81 надо выбирать изделия, имеющие то же функциональное назначение и соответствующее лучшим отечественным и зарубежным аналогам. Из всех аналогов выбирают наиболее подходящий прототип, по функциональным и материальным показателям которого можно рассчитать удельные коэффициенты (разд. 1.1) и далее использовать их для оценочных расчетов масс и габаритов разрабатываемого изделия.

Выбор метода конструирования во многом определяется назначением и условиями эксплуатации изделия. Как известно [10], одним из общих методов конструирования является модульный (или базовый), основанный на принципах функциональной и размерной взаимозаменяемости, схемной и конструктивной унификации. На его основе были разработаны унифицированные функциональные узлы, микромодули, ин-

тегральные схемы (разд. В.2), а с введением базовых несущих конструкций (БНК) — многие конструкции современных ЭВМ, самолетных РЭС и др. Этот метод может быть рекомендован для РЭС наземного использования многоблочных конструкций. Иногда неправильно считают, что »для бытовой радио- и электронной аппаратуры, такой как телевизионные приемники и калькуляторы, этот метод наиболее приемлем с использованием БНК. По-видимому, БНК тут ни при чем, а на первый план должны быть выдвинуты требования эргономики и дизайна.

При конструировании бортовых РЭС, например ракетных, космических, для которых предъявляются жесткие требования к массе, габаритам и форме, отраслевая унификация вряд ли приемлема. Поэтому в этих конструкциях наблюдается четко выраженная как схемная, так и конструктивная специфика методов конструирования. Однако при выборе компоновки можно различать два основных метода: блочный и функционально-узловой (объемная и планарная компоновка). Для самолетных РЭС нетранспортной авиации характерна моноблочная компоновка устройств по «разбросанному варианту» в пределах фюзеляжа, а для транспортной авиации — в стойках по функционально-узловому методу. Для ракетных РЭС практически всегда применим функционально-узловой метод с компоновкой в контейнерах, для космических аппаратов — комбинированный. После выбора метода конструирования, зная состав каждого блока или устройства, инженеры-конструкторы КБ выбирают варианты компоновочных схем ФЯ, а далее блоков и компонуют их в общих несущих конструкциях. При этом разрабатывается эскизная проектная документация на изделия в виде сборочных чертежей и спецификаций. При ее разработке учитываются ранее выявленные требования на условия эксплуатации, электромагнитную совместимость, форму, массу, габариты и др.

Конструкторские расчеты позволяют получить ответ на следующие вопросы: удовлетворяет ли разработанная конструкция требованиям вибро- и ударопрочности, нормального теплового режима. Допустимых массы, габарита, соответствует ли мировым стандартам по показателям качества или нет. Если хотя бы по одному из параметров расчет не подтверждает допустимой величины, то конструкция должна быть переработана. Если же при расчетах выявляются чрезмерные запасы по параметрам, то и в этом случае конструкция требует изменений, например уменьшения массы за счет неоправданного увеличения ее жесткости.

Оптимизация (синтез) конструкции подразумевает выявление среди группы показателей качества конструкции наиважнейшего — целевой функции — и перевод всех остальных параметров в разряд ограничений или условий. С помощью известных методов оптимизации определяют оп-

тимальное значение целевой функции и по ней корректируют все параметры конструкции, после чего разрабатывают рабочую документацию. Выбор элементной базы и материалов конструкций РЭС проводится по критерию предпочтения [13]

$$Q_j = \sum_{i=1}^m j_i a_i, \sum j_i = 1 \quad (3.1)$$

где m — число параметров компонента (материала); φ_i — коэффициент значимости («веса») i -го параметра, $i = 1, 2, \dots, m$; a_i — нормированный параметр компонента (материала).

Если рассматриваются по критерию предпочтения/ вариантов для выбора из них предпочтительного, то значения критерия предпочтения для каждого варианта оцениваются по формуле

$$Q_j = \sum_{i=1}^m j_i a_{ij} = 1 \quad (3.2)$$

где a_{ji} — нормированный параметр i относительно одного из выбранных вариантов/ (или значения параметра заданного ТЗ на проектирование), $a_j = 1, 2, \dots, n$.

Коэффициенты значимости определяются методом экспертных оценок по результатам небольшой статистической совокупности данных, полученных путем опроса k специалистов данного профиля конструирования конкретного класса РЭС. Известными способами обработки статистических данных определяют среднее значение $\varphi_{i.}$ и среднеквадратичное σ_{φ_i} ; при этом те значения φ_{ik} которые лежат за пределами $\pm 3 \sigma_{\varphi_i}$, отбрасывают и снова определяют $\varphi_{i.}$ которые и используют в дальнейших расчетах. Для нахождения нормированных значений параметров a_{ji} , вначале составляют матрицу

(// X //)	$x_{11} \ x_{12} \dots x_{1i} \dots x_{1m}$

	$x_{j1} \ x_{j2} \dots x_{ji} \dots x_{jm}$

	$x_{n1} \ x_{n2} \dots x_{ni} \dots x_{nm}$

Где x_{ij} — справочные данные на i -й параметр в j -ом варианте

Поскольку с увеличением одних параметров качество изделия улучшается, а с увеличением других — ухудшается, то последние преобразуются в обратные величины и составляется матрица

$$\| \| Y \| \|$$

y_{11}	y_{12}	.....	y_{1i}	.....	y_{1m}
.....
y_{j1}	y_{j2}	.....	y_{ji}	.....	y_{jm}
.....
y_{n1}	y_{n2}	.....	y_{ni}	.....	y_{nm}

в которой для первых параметров приняты $y_{ij} = x_{ij}$ а для вторых (ухудшающих качество) — $y_{ij} = 1/x_{ij}$

При оценке сравнения вариантов по качеству можно остановиться на этой второй матрице и по формуле (3.2), заменив y_{ij} на a_{ij} ,, рассчитать Q_j . Вариант, обладающий большим значением критерия качества, будет предпочтительным. Можно также продолжить вычисления, введя матрицу

$$\| \| A \| \|$$

a_{11}	a_{12}	.....	a_{1i}	.....	a_{1m}
.....
a_{j1}	a_{j2}	.....	a_{ji}	.....	a_{jm}
.....
a_{n1}	a_{n2}	.....	a_{ni}	.....	a_{nm}

где $a_{ij} = (y_{j \max} - y_{ij}) / y_{j \max}$, $y_{j \max}$ — максимальное значение параметра i в матрице $\| \| Y \| \|$ для j -го варианта (столбца матрицы).

Чем ближе y_{ij} к $y_{j \max}$, тем ближе этот вариант к высокому качеству, разность же (числитель) a_{ij} будет меньше, следовательно, и само значение Q_j получится меньше. Поэтому предпочтительным вариантом надо считать тот, у которого величина Q будет минимальной.

Пример 3.1. Пусть задано спроектировать ЭВМ, к которой предъявляются основные требования по минимально возможной массе m , высоким быстродействию и надежности. Для серий логических ИС главными паспортными параметрами являются: I_3 — время задержки сигнала, U_{nx} — напряжение помехи (уровень статической помехоустойчивости тем выше, чем больше это значение), $P_0 (I_0)$ — потребляемая мощность (ток), n — коэффициент разветвления по выходу (нагрузочная

способность), масса корпуса m_k . В табл. 3.1 представлены исходные данные для выбора предпочтительного варианта из нескольких серий ИС, а также коэффициенты значимости параметров.

Таблица 3.1

Серия ИС	t_3 , нс	$u_{пх}$ В	I_0 , мА	m_k , г
К155	11	0,4	11 ... 50	1,2
К134	60 ... 100	0,3	$(1... 3)10^{-3}$	1,0
К531	5	0,5	30	1,0
К555	20 ... 35	0,5	4	1 ... 1,2
Ф,-	0,35	0,2	0,1	0,35

Запишем матрицу $||X||$:

	$|| X ||$	|	$t_3,$	$u_{пх}$	$I_0,$	$m_k,$	|
			11	0.4	50	1.2	
			100	0.3	$3 \cdot 10^{-3}$	1.0	
			5	0.5	30	1.0	
			35	0.5	4	1.0	

Далее составим матрицы $||Y||$ и $||A||$:

	$|| Y ||$	|	0.09	0.4	0.02	0.8	|
			0.01	0.3	333	1	
			0.2	0.5	3.33	1	
			0.03	0.5	0.25	1	

	$|| A ||$	|	0.55	0.2	1	0.8	|
			0.95	0.4	0	0	
			0	0	0.99	0	
			0.85	0	0.999	0	

Рассчитаем показатели Q для этих вариантов:

$$Q_1 = 0,35 \cdot 0,55 + 0,2 \cdot 0,2 + 0,1 \cdot 1 + 0,35 \cdot 0,2 = 0,4025,$$

$$Q_2 = 0,35 \cdot 0,95 + 0,2 \cdot 0,4 = 0,4125,$$

$$Q_3 = 0,1 \cdot 0,99 = 0,099,$$

$$Q_4 = 0,35 \cdot 0,85 + 0,1 \cdot 0,999 = 0,3974.$$

Таким образом, третий вариант (серия К531) — предпочтительнее.

Аналогичным образом можно выбирать материалы печатных плат, корпусов, рамок, а также типы ЭРЭ, если среди многих их характеристик выбрать наиболее влияющие на качество РЭС, например на жесткость и прочность несущих конструкций, надежность, стабильность и точность ЭРЭ и т.п.

3.2. Конструирование цифровых функциональных ячеек и блоков на печатных платах

Конструкции цифровых РЭС, выполненные на печатных платах, относятся к конструкциям III поколения, достоинства и недостатки которых были рассмотрены в разд. В. 2. Здесь же отметим основные особенности конструктивов ячеек и блоков этого поколения для цифровых РЭС и связанные с ними правила конструирования.

Первой особенностью этих конструктивов является регулярность компоновки, т.е. размещения основных базовых элементов конструкции, например ИС, на несущей конструкции — печатной плате рядами и столбцами, вызванная регулярностью построения самой схемы устройства. Такая же регулярность компоновки соблюдается и при размещении ФЯ в блоки, а блоков — в стойки, шкафы и пульты.

Второй особенностью следует считать планарность формы основного типового элемента замены (ТЭЗ) — функциональной ячейки, обусловленную применением корпусированных ИС широкого применения плоской прямоугольной формы (табл. 3.2).

Третья особенность таких конструктивов состоит в том, что они используются для создания цифровых РЭС, как правило, наземного применения в виде многоблочных крупногабаритных устройств и комплексов, например наземных ЭВМ. Это накладывает свой отпечаток на габариты печатных плат (наиболее употребительными размерами их являются 170x75 мм и 170x200 мм, хотя в ряду рекомендуемых есть и меньшие размеры).

Четвертой особенностью конструктивов является наличие значительных тепловых напряженностей в них, поскольку в многоблочных конструкциях общее число компактно расположенных микросхем может достигать нескольких тысяч, что требует часто дополнительных систем охлаждения, например принудительной вентиляции.

Наконец, пятой особенностью конструктивов являются требования повышенной эксплуатационной взаимозаменяемости ТЭЗ, ремонтпригодности и технологичности конструкций, что приводит к необходимо-

Таблица 3.2

Пц. п/п	Тип кор- пуса	Серии ИС	Функциональное назначение ИС	Размеры корпуса, мм	Масса, г	Число за- действ	Шаг установк	
							X	У
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	201.44	K155, K545, K555, KM555, K561	Логические элементы, триггеры, счетчики, инверторы, повторители, дешифраторы, ЗУ, токовые ключи, регистры, умножители	19,5x6,8x5	1,1	9	22,7	15,0
						12	25,0	17,5
						14	27,5	20,5
2.	238.16 2103.1 6	K155, K555, KM555, K561	То же, кроме токовых ключей	21,5x6,8x5	1,5	12	25,0	15,0
						14	27,5	17,5
						16	30,0	17,5
3.	2107.1	K500.K541	БИС-ОЗУ	25,5x10x5	2,0	—	—	—
4.	239.24 2120.2 4	K155, K561, K583, KP583 K1802, KP1802	Логические элементы, триггеры, счетчики, инверторы, повторители, дешифраторы, ЗУ, регистры, БИС-МПК	31,5x15x5, 5	4,0	20	45,0	22,5
						22	45,0	25,0
						24	47,5	25,0
5.	2121.2 8	KP556, K573, KP580, KP588. KP568, K1804	Многофункциональные схемы, ПЗУ, БИС-МПК	37x15x5	4,2	—	—	—
6.	2123.4 0	KP580, KP584 K1804	Многофункциональные 'схемы, контроллеры, БИС-МПК	51,5x15x5, 5	6,5	32	60,0	27^
						36	62,5	32,5
						40	65,0	37,5
7.	2206.4 2	KP588, KP1802	БИС-МПК	27x20x5	4,5	—	—	—
8.	244.48	K583, KP583	БИС-МПК, контроллеры технологических процессов	31,2x12x3, 8	5,5	40	62,5	40,0
						44	67,5	45,0
						48	72,5	47,5
9.	2136.6 4	K1107, K1802	Умножители, АЦП	82x22x7,5	22,0	50	90,0	45,0
						56	90,0	50,0
						64	95,0	55,0

1	2	3	4	5	6	7	8	9
10.	401.14	К561 и аналоги серии К155	Логические элементы, триггеры, счетчики, инверторы, повторители, дешифраторы, ЗУ	9,8x6,5x2,3	1,0	10	12,5	15,0
						12	15,0	17,5
						14	15,0	20,0
11.	402.16	КР541 и аналоги серии К155	То же, в том числе ПЗУ	12x9,5x2,5	1,5	14	12,5	20,0
						16	17,5	20,0
12.	405.24	К561, К583 КР583	Логические элементы, счетчики, регистры, ОЗУ, дешифраторы, ЦАП, БИС-МПК	18x11x3,2		—	—	—
13.	4118.24	К561, КР584 КР588, КР1802	Логические элементы, счетчики, дешифраторы, контроллеры	15,6x13,2x 3,2	2,0	—	—	—
14.	4131.24	КР537, К596	БИС-ПЗУ	34,4x5,8x3, 2	4,0	—	—	—
15.	4134.48	К572, К583 КР583, КР584	Контроллеры технологических процессов, АЦП, БИС-МПК	30,4x15,8x 3,2	4,5	40	37,5	32,5
						44	37,5	35,0
						48	40,0	40,0
16.	Н02.14— 1В Н104.14	К561 и ее аналоги	Логические элементы, счетчики, регистры, дешифраторы, умножители	7,5x7,5x3	0,5	10	12,5	15,0
						14	15,0	17,5
						16	17,5	17,5
17.	Н04.16— 1В Н207.16	То же	То же	8,8x8,8x3	0,6	10	15	15,0
						12	17,5	15,0
						16	17,5	17,5
18.	Н06.24— 2В Н208.24	То же	То же	10,2x8,6x3	0,65	16	17,5	17,5
						20	20,0	17,5
						24	20,0	20,0
19.	Н1 4.42— 2В Н303.42	КР1802	БИС-МПК	13x13x3	1,6	36	32,5	32,5
						42	35,0	32,5

сти конструирования унифицированных базовых несущих конструкций (БНК), а также применения наиболее употребительной разъемной компоновки блоков.

Отличительным признаком конструктива цифровых РЭС на печатных платах является наличие корпусированных стандартных ИС, размещенных на печатной плате.

В процессе конструирования цифровой ФЯ решают следующие основные задачи:

- выбор варианта конструкции ячейки;
- расчет типоразмера печатной платы;
- выбор типа электрического соединителя, элементов крепления, фиксации и контроля;
- выбор метода изготовления печатной платы;
- обеспечение нормального теплового режима;
- защиту конструкции ячейки от влияния факторов внешней среды.

Выбор варианта конструкции ячейки зависит от требований ТЗ на блок, в котором она используется, и главным образом от назначения и условий эксплуатации устройства. В зависимости от заданной формы и габаритов блока на первых стадиях разработки могут быть ориентировочно установлены размеры печатной платы ФЯ и их число в блоке. По заданной электрической схеме выбирают тип корпуса ИС и рассчитывают нагрузку на печатную плату, а далее проводят расчет вибропрочности ФЯ (разд. 4.3). Исходя из полученных результатов расчета и выбранного типа корпуса ИС осуществляют выбор варианта конструкции ФЯ (с рамкой, без рамки, одно- или двухстороннее расположение элементов).

Расчет типоразмера печатной платы проводят по количеству ИС в ячейке, выбранному типу корпуса, числу задействованных от него выводов, толщине печатной платы и подбирают по ГОСТ 10317-79 приемлемые размеры печатной платы (см. разд. 9.1).

Выбор типа электрического соединителя ФЯ зависит от принятой компоновки их в блок (разъемной или книжной). При разъемной компоновке тип соединителя выбирают согласно правилам, изложенным в разд. 7. В случае книжной конструкции применяют гибкие шлейфы либо гибкие кабели. Выбор элементов фиксации и контроля проводят по рекомендациям ОСТ 4Г. 0.010.009 — ред. 3-76. Метод изготовления печатной платы выбирают по количеству возможно размещаемых корпусов ИС на выбранной ее площади и по разрешающей способности печати.

Задача обеспечения теплового режима ФЯ решается путем теплового расчета в комплексе всего блока, однако существуют и некоторые общие установки по размещению элементов на печатной плате и самих ячеек в блоке:

наиболее теплонагруженные навесные ЭРЭ необходимо располагать по периметру печатной платы;

при применении ИС с высоким тепловыделением под их корпусами необходимо обеспечивать наличие теплоотводящих шин, соединенных в общий коллектор тепла;

вертикальное расположение самих ФЯ в блоке всегда предпочтительнее горизонтального.

Защита конструкции ФЯ от влияния факторов внешней среды, особенно влаги, требует обеспечения гидрофобности поверхности печатной платы и самих компонентов. Наличие влаги с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 80$ может резко увеличить паразитную погонную емкость между печатными проводниками, а следовательно, ухудшить быстродействие, и при большом количестве влаги создать короткое замыкание между ними. Поэтому чаще всего ФЯ покрывают полиуретановыми лаками с хорошими высокочастотными свойствами ($\epsilon = 2,2$ и $\text{tg}\delta = 2 \cdot 10^{-4}$), например УР-231. При сочетании действия влаги и повышенной температуры рекомендуют применение кремнийорганических лаков ($\epsilon = 3,5$, $\text{tg}\delta = 10^{-3}$, $t_{\text{max}} = + 200^\circ \text{C}$, рабочие частоты $10^6 \dots 10^{10}$ Гц), например КО-921.

Основной задачей при конструировании цифрового блока является выбор оптимальной формы блока (разд. 3.8) при выбранной его компоновке. Для блоков цифровых РЭС III поколения наиболее характерными компоновочными схемами являются разъемная, т.е. с применением разъемных соединителей на печатных платах, и книжная, в которой ФЯ могут разворачиваться относительно оси вращения («переплета») наподобие страниц книги.

При разъемной компоновке конструкции ответные части разъемов укрепляют рядами на общей соединительной плате. Соединения ячеек с межблочными разъемами, укрепленными на одной из стенок корпуса, осуществляют от выводов разъемов либо печатными проводниками, либо проволочными проводниками, связанными в жгуты. Ремонт и проверка ФЯ проводится в вынутом (выключенном) состоянии или во включенном, но с помощью переходника — дополнительной монтажной платы, на верхней и нижней сторонах которой размещены части такого же разъема, соединенные печатными проводниками. Книжная компоновка блоков более компактна и позволяет осуществлять ремонт и проверку ячеек во включенном состоянии при их развороте относительно оси вращения. Однако замена неисправной и неремонтируемой ячейки затруднена, так как монтаж между ячейками осуществлен отрезками гибких шлейфов или гибких кабелей, печатные проводники или проволочные выводы которых приварены или припаяны к вывод-

ним контактными площадками и штырям печатных плат ячеек, а сама цепочка шарнирных соединений, образующая основу «переплета» книги, расклепана, и поэтому нужна сверловка заклепок.

На рис. 3.1 представлена конструкция ФЯ блока разъемного типа с разъемным соединителем типа ГРПМ. Для повышения вибропрочности

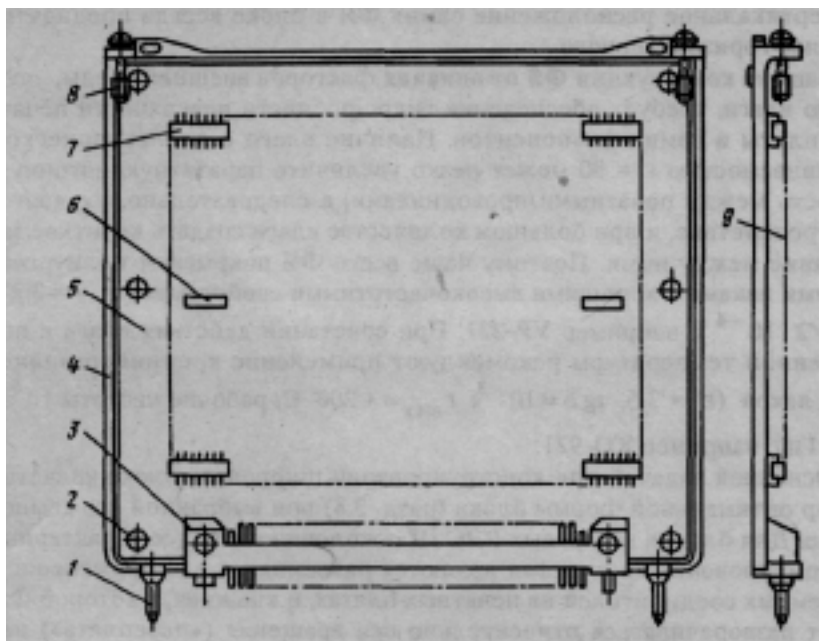


Рис. 3.1. Конструкция ФЯ блока разъемного типа:
j — штырь-ловитель; 2 — развальцованная заклепка; 3 — вилка соединителя ГРПМ;
 4 — обечайка; 5 — печатная плата; 6 — навесной ЭРЭ; 7 — корпусированная ИС;
 8 — невывпадающий винт; 9 — зона установки схемных элементов

печатная многослойная плата обрамлена алюминиевой рамкой, в нижней части которой укреплены фиксаторы положения (штыри-ловители), а в верхней части — элементы крепления ФЯ в каркасе блока (невывпадающие винты). Верхняя планка рамки имеет два отверстия для вынимания ячейки из блока с помощью крючка. Печатная плата на буртиках рамки развальцовывается пустотелыми заклепками (латунными пистонами). Компоновка микросхем в корпусах II типа (пластмассовые со штырьевыми выводами за пределами проекции тела корпуса) однозначно определяет одностороннюю компоновку компонентов и рекомендуемый вид пайки в массовом производстве — пайку волной припоя. На рис. 3.2 показана конструкция блока разъемного типа.

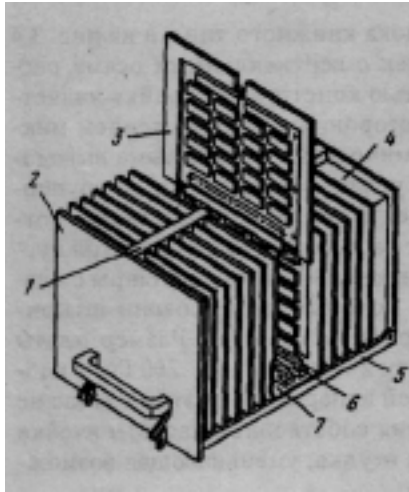


Рис. 3.2. Конструкция блока разъемного типа:
 1 — соединительная планка крепления;
 2 — передняя стенка;
 3 — функциональная ячейка;
 4 — монтажно-распределительная коробка;
 5 — каркас-поддон;
 6 — соединитель ГРПМ;
 7 — общая трассировочная плата
 (кроссплата)

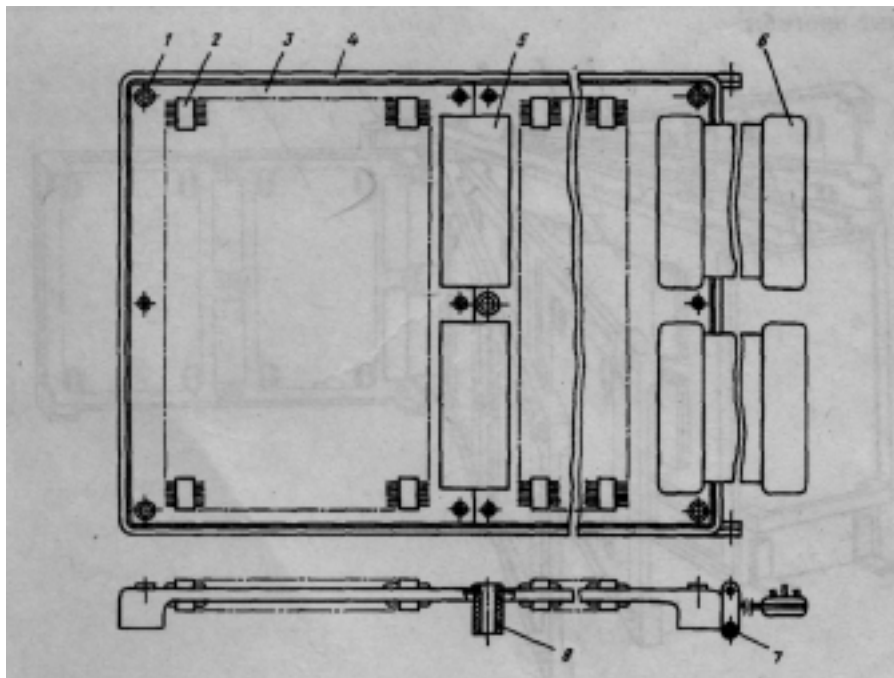


Рис. 3.3. Конструкция ФЯ блока книжного типа:
 ; — развальцованная заклепка; 2 — корпусированная ИС;
 3 — печатная плата; 4 — обечайка; 5 — отрезок гибкого шлейфа;
 6 — колодка гибкого шлейфа; 7 — элемент шарнирного
 крепления; 8 — упорная втулка

На рис. 3.3 дана конструкция ФЯ блока книжного типа, а на рис. 3.4 конструкция самого блока из этих ячеек с вертикальными осями раскрытия двух пакетов ячеек. Особенностью конструкции ячейки является наличие двух печатных плат с двухсторонним расположением микросхем в корпусе IV типа (металлокерамический с планарными выводами) и рамки-обечайки с выступами по углам. Метод пайки — групповой, общим паяльником-прижимом. Соединения между платами — отрезки гибких шлейфов, крепление плат на рамке — развальцовкой пустотелыми заклепками, выводные соединители — гибкие шлейфы с пластмассовыми накладками на концах, в которых запрессованы штыривыводы под металлизированные отверстия на платах. Размер платы 170x240 мм снижает собственную частоту ячейки до 150...200 Гц, и вибропрочность, требуемая для авиационной аппаратуры, в этом случае не обеспечивается. Поэтому для увеличения собственной частоты ячейки в центре между ФЯ укреплена упорная втулка, уменьшающая возможные прогибы.

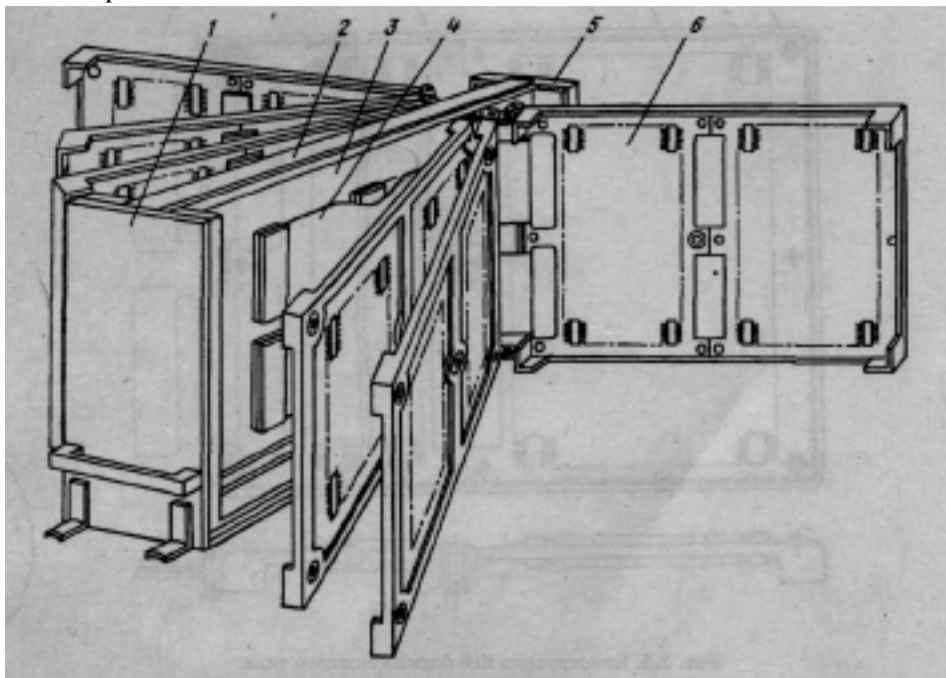


Рис. 3.4. Конструкция блока книжного типа III поколения:
 1 — передняя стенка; 2 — средняя стенка (каркас); 3 — кроссплата;
 4 — гибкий шлейф; 5 — задняя стенка; 6 — функциональная ячейка

3.3. Конструирование цифровых функциональных ячеек и блоков на бескорпусных микросборках

Главной особенностью конструкций цифровых РЭС на бескорпусных микросборках является возможность уменьшения объема в пять раз и массы в три раза по сравнению с конструкциями этого уровня на корпусированных микросхемах. Одновременно повышается и надежность изделий за счет уменьшения числа паяных соединений и увеличения интеграции микросборок. Вместе с тем появляется ряд специфических существенных особенностей и требований к новым конструкциям. Рассмотрим их более подробно.

Значительное уменьшение объема в цифровых ФЯ с одновременным увеличением быстродействия их работы, а следовательно, и увеличением потребляемой мощности приводит к резкому возрастанию тепловой напряженности в них и нарушению нормального теплового режима, что вызывает отказы в работе. Поэтому первой специфической чертой новых конструкций ФЯ цифрового типа является наличие в них мощных и эффективных теплоотводов. Такими теплоотводами являются металлические основания под бескорпусными МСБ и, в частности, металлические рамки. Эти рамки, как правило, выполняют из алюминиевых сплавов АМг, АМц, В95, имеющих высокие значения коэффициентов теплопроводности (160...180 Вт/(м·К)). Вторая специфическая особенность этих конструкций заключается в том, что размещаемые на металлических рамках бескорпусные МСБ (порядка восьми и более штук) имеют значительное количество сигнальных входов и выходов, а также шин питания и земли (порядка 24...30 с одной МСБ), что приводит к появлению в конструкции большого числа тонких ($d = 30...50$ мкм) золотых проволочек — соединительных проводников, с одной стороны приваренных (припаянных) к внешним контактным площадкам МСБ, а с другой — к «язычку» металлизированных отверстий печатной платы. При механических воздействиях, несмотря на небольшой прогиб этих проволочек (длина проволочки $l \leq 100 d$), возможны отрывы в местах приварки (пайки), т.е. внезапные отказы в соединениях и сбои во всей ячейке. Кроме того, увеличение интеграции микросборок, а следовательно, и площади самих подложек при постоянстве их толщины, опять-таки создает опасность их растрескивания от ударов и вибраций. Чтобы выполнить требования защиты конструкции от механических резонансов, усталостных напряжений, линейных перегрузок, в конструкциях ячеек IV поколения используют те же металлические рамки, но характерной чертой их профиля является наличие ребер жесткости и окон, а сами МСБ и печатные платы клеят к этим рамкам антивибраци-

онными компаундами типа КТ-102 или «Эластосил» для уменьшения коэффициентов динамичности рамок. Наконец, требование уменьшения массы заставляет делать эти рамки более ажурными.

Таким образом, спецификой конструкции ФЯ IV поколения цифрового типа является наличие легких и прочных металлических рамок, гарантирующих достаточный теплоотвод, вибро- и ударопрочность ячеек. Обычно вибро- и ударопрочность обеспечиваются при выполнении допустимых амплитуды колебаний элементов конструкции не более 0,3 мм и виброскорости не более 800 мм/с. Диапазон же частот вибраций широк (от 30...50 Гц до 0,5...5 кГц) при возможных перегрузках до 30...40 единиц. Допустимая удельная мощность рассеяния в ФЯ может достигать величины 60 Вт/дм³.

На рис. 3.5 показана конструкция металлической рамки, а на рис. 3.6 представлена схема установки и монтажа бескорпусных МСБ на ней.

Пример 3.2. Рассчитать геометрические размеры рамки, представленной на рис. 3.5. В рамке на ее вертикально расположенных планках размещены восемь МСБ с размерами 24х30х0,5 мм.

Из расчетов вибропрочности и теплового режима ширина Δ_1 боковых ребер и верхнего ребра обычно составляет 3 мм, а ширина Δ_2 внутренних ребер и нижнего ребра 2 мм. Это отличие объясняется еще и тем, что боковые и верхние ребра должны иметь буртик порядка 1...1,5 мм для приклейки печатной платы по периметру ребер снизу. Ширина планки Δ_3 несколько меньше ширины МСБ и равна 21 мм. Ширина окон Δ_4 в рамке (между ребрами и планками) выбирается из следующих размеров (см. рис. 3.6): расстояния от ребра и планки до «язычка» и металлизированного отверстия (слева и справа) равны 2,5 мм, длина «язычка» (для подпайки или приварки проволочного вывода) — 1 мм, диаметр окантовки металлизированного отверстия — 1,2 мм, итого ширина окна $\Delta_4 = 7,2$ мм. Тогда ширина рамки

$$a = 2 \Delta_1 + 3 \Delta_2 + 4 \Delta_3 + 8 \Delta_4 = 2 \cdot 3 + 3 \cdot 2 + 4 \cdot 21 + 8 \cdot 7,2 = 154 \text{ мм.}$$

Для расчета длины рамки примем, что зазоры l_1 между МСБ на планке и между ними и горизонтальными ребрами равны 1,5 мм, ширина окна l_2 для навесных электрорадиоэлементов и ширина зоны l_3 для межъячеечного монтажа — по 10 мм, размеры ребер: $l_4 = 3$ мм — верхнее ребро и $l_5 = 2$ мм — среднее и нижнее ребра, уже оговорены. Тогда длина рамки (при длине МСБ $l = 30$ мм)

$$b = l_4 + 2l + 3l_1 + 2l_5 + 2l_2 = 3 + 2 \cdot 30 + 3 \cdot 1,5 + 2 \cdot 2 + 2 \cdot 10 = 91 \text{ мм.}$$

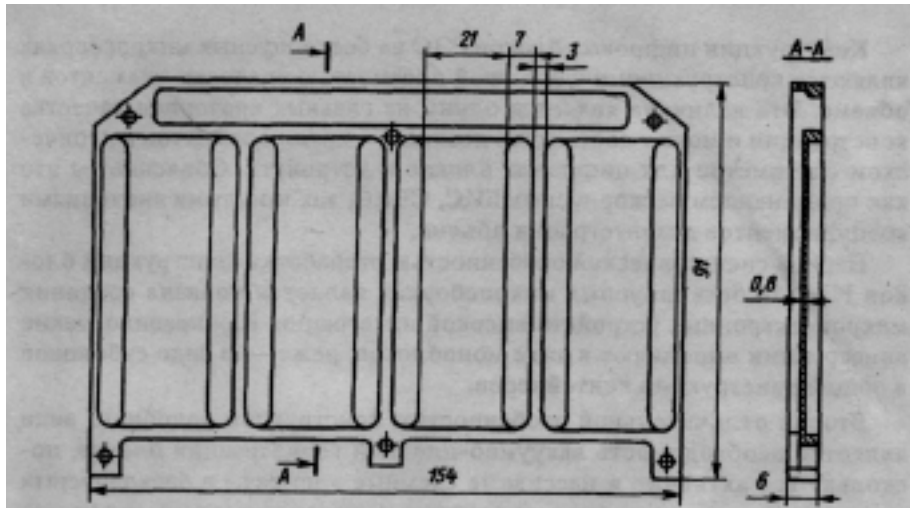


Рис. 3.5. Металлическая рамка

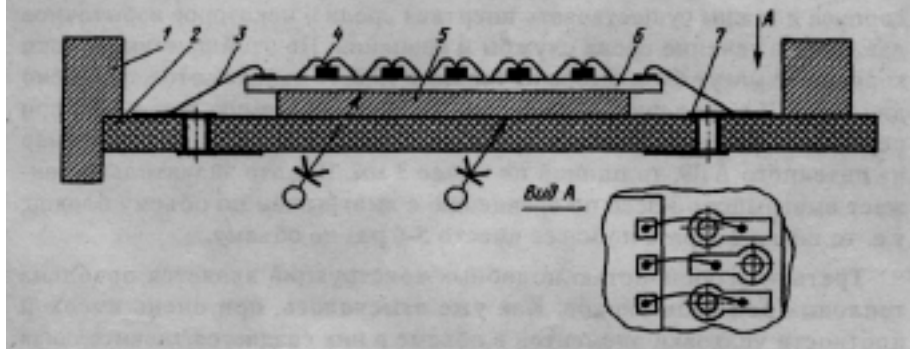


Рис. 3.6. Схема установки и монтажа бескорпусных МСБ на металлической рамке:
 1 — ребро рамки; 2 — печатная плата; 3 — соединительный проводник;
 4 — бескорпусная ИС; 5 — планка; 6 — подложка; 7 — металлизированное отверстие

Высота рамки

$$h_p = h_{МСБ} + h_{пл} + h_{ПП} + h_{кл} + h_{звз}$$

где $h_{МСБ} = 1$ мм — высота МСБ, $h_{пл} = 0,8$ мм — толщина планки, $h_{ПП} = 1,5$ мм — толщина печатной платы, $h_{кл} = 0,2$ мм — толщина клея, $h_{звз} = 2,5$ мм — величина суммарного воздушного зазора. Тогда $h_p = 1 + 0,8 + 1,5 + 0,2 + 2,5 = 6$ мм.

Конструкции цифровых блоков РЭС на бескорпусных микросборках являются конструкциями с большой плотностью упаковки элементов в объеме. Эта величина является одним из главных критериев качества конструкции и может составлять десятки — сотни элементов в кубическом сантиметре для цифровых блоков и устройств. Объясняется это как применением бескорпусных БИС, СБИС, так и малыми значениями коэффициентов дезинтеграции объема.

Первой специфической особенностью разработки конструкций блоков РЭС на бескорпусных микросборках является новизна создания микроэлектронных устройств высокой интеграции. Как правило, такие конструкции выполняют в виде моноблоков, реже — в виде субблоков в общей конструкции контейнеров.

Второй отличительной особенностью конструкций подобного вида является необходимость вакуумно-плотной герметизации блоков, поскольку все активные и пассивные схемные элементы в бескорпусных микросборках не защищены от влияния факторов внешней среды, таких как солнечная радиация, фоновые излучения, теплоудары, влага, пониженное давление и др. Внутри вакуумно-плотного герметичного корпуса должны существовать инертная среда и некоторое избыточное давление в течение срока службы и хранения. По этой причине стенки корпуса не могут быть выбраны тонкими (0,8...! мм), как это характерно для РЭС III поколения, а чтобы обеспечить требуемую жесткость при перепадах давления их выполняют из алюминиевых сплавов, например из литейного АЛ9, толщиной не менее 3 мм. Все это значительно снижает выигрыш по массе по сравнению с выигрышем по объему блоков, т.е. только в 3-4 раза по массе вместо 5-6 раз по объему.

Третьей особенностью подобных конструкций является проблема тепловых режимов блоков. Как уже отмечалось, при очень высокой плотности упаковки элементов в объеме в них создается значительная тепловая напряженность, способная привести к увеличению частоты отказов в аппарате. Все это требует увеличения эффективности способов теплопередачи конвекцией, лучеиспусканием и теплопроводностью. Если на уровне ФЯ в основном теплопередача определяется теплопроводностью и с этой целью конструируются теплопередающие рамки, то для блоков, имеющих собственные герметичные корпуса, основными видами теплопередачи служат конвекция и лучеиспускание, а в условиях невесомости — только лучеиспускание. Поэтому здесь значительная проработка конструкции должна вестись в направлении выбора оптимальной формы блока, для которой отношение поверхности теплоотдачи к объему было бы максимально возможным при сохранении и выполнении всех остальных требований на вибропрочность, тех-

нологичность, электромагнитную совместимость и др., накладываемых техническим заданием на конструирование. Более подробно эти вопросы рассмотрены в разд. 3.6.

Четвертой особенностью разработки конструкций блоков IV поколения можно считать проблему выбора внутриблочных электрических соединений. Как правило, блоки на бескорпусных МСБ имеют книжную конструкцию, в которой не применяются разъемные соединители и проволочно-жгутовой или печатный монтаж на жестких основаниях. Для них наиболее характерным являются гибкие шлейфы, гибкие кабели, в том числе и радиочастотные миниатюрные типа РК-50-0,6-25 с внешним диаметром 1,0 мм, а также гибкие матрицы-ремни. От выбора варианта внутриблочного монтажа зависит требуемый внутренний объем блока, надежность «переплета» книжной конструкции, способ закрепления гибких шлейфов и их монтажа (пайкой, сваркой, с накладками или без них и др.). Замена жесткой объединительной печатной платы на гибкую печатную плату и ее размещение, способы ее соединения с ячейками и межблочными разъемами являются также непростыми задачами конструирования.

Наконец, пятой особенностью разработки конструкций блоков IV поколения является выбор формы и метода изготовления корпуса блока. Отметим, что одна из стенок блока (лицевая панель), на которой устанавливаются выводные межблочные соединители, трубка-штенгель, заземляющий винт, должна иметь толщину не менее 5...6 мм, в то время как остальные — 3 мм. Сам корпус, в котором устанавливается пакет ячеек (обычно на шесть бобышек цилиндрической формы), должен представлять собой без верхней крышки короб прямоугольной формы. Материал корпуса, как и ФЯ, должен быть легким. Поэтому выбирают чаще всего алюминиевые сплавы, легко поддающиеся механической обработке и сварке. Кроме того, при применении паяного шва корпус должен иметь покрытие для пайки. С учетом перечисленных выше требований, можно дать следующие рекомендации:

лицевую панель следует изготавливать отдельно от корпуса и приваривать ее по шву в процессе сборки;

из многих марок легких алюминиевых сплавов (Д16АМ, Д16АТ, В95, АМг, АМц, АЛ9, АЛ2, АЛИ) наиболее подходящими для шовной сварки являются марки АМг, АМц, АЛ9;

сделать корпус с толщиной стенок 3 мм из листового материала (АМг, АМц, Д16, В95) методами штамповки-вытяжки при глубине вытяжки порядка 80 мм весьма затруднительно, так как это требует многократной вытяжки и пресса большой мощности, поэтому корпус рекомендуют изготавливать литьем в оболочковые формы из материалов

АЛ2, АЛ9, АЛ 11 (сплавы алюминиевые литейные ГОСТ 2685-63) с последующей фрезеровкой поверхности, требующей более высокой частоты обработки;

места последующих паяк (паяный шов, буртик в лицевой панели для пайки печатной вставки разъемов РПС или отверстий для высокочастотных разъемов СР50, земляного винта, трубки-штенгеля) рекомендуется покрывать Н5.М12.0-Ви9 (гальваническое покрытие «никель 5 мкм — медь 12 мкм — олово — висмут 9 мкм»).

Наиболее характерными компоновочными схемами цифровых ФЯ на бескорпусных микросборках являются односторонняя и двухсторонняя на металлической рамке и двухсторонняя на П-образом металлическом основании, а для блоков — книжная компоновочная схема.

Конструкция односторонней ФЯ показана на рис. 3.7. Она выполнена на алюминиевой рамке, показанной на рис. 3.5, на продольных планках которой приклеены клеем «Эластосил 11-02» бескорпусные МСБ. С обратной стороны рамки приклеена односторонняя печатная плата из стеклотекстолита СФ-1-35-1,0 клеем КВК-68. Монтаж бескорпусных МСБ с печатной платой осуществляется проволочными проводниками из золота Зл999 диаметром 0,03 мм и длиной не более 3 мм. В верхней части ячейки расположено «окно» рамки для установки дискретных ЭРЭ, а в нижней части — зона выводных контактных площадок под

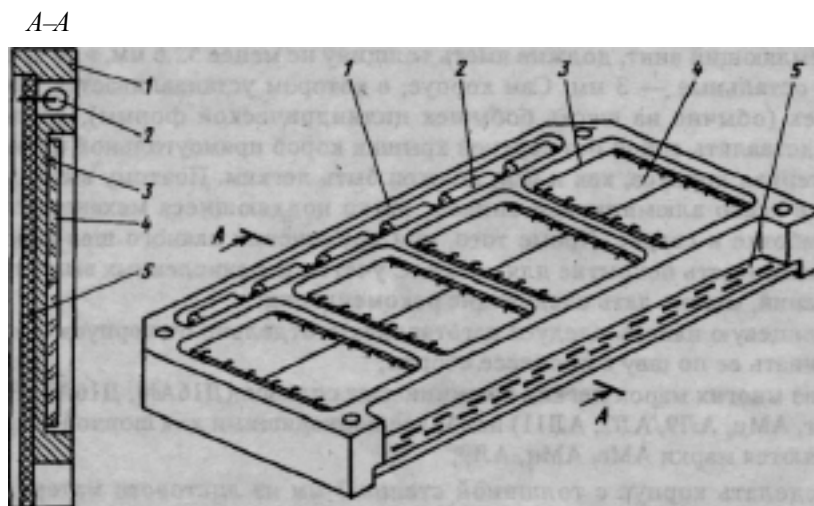


Рис. 3.7. Конструкция односторонней ФЯ на металлической рамке:
1 — рамка; 2 — навесной ЭРЭ; 3 — планка; 4 — микросборка; 5 — печатная плата

гибкий шлейф или матрицу-ремень. В рамке имеется 4...6 сквозных отверстий для стяжных винтов МЗ для сборки ячеек в пакет. Длина винтов выбирается в зависимости от высоты пакета, т.е. числа собираемых ячеек. Если в рамке планки выполняются в едином технологическом процессе литья с последующей фрезеровкой, то рамка имеет защитное покрытие Ан.Окс.хр. (анодизационное оксидирование с хромотацией). Если планки припаивают к рамке, то применяют гальванопокрытие Н5.М12.0-Ви 9 или химическое покрытие 0-Ви3.

Конструкция двухсторонней ФЯ на металлической рамке представлена на рис. 3.8. Ее отличие от рассмотренной ячейки состоит в том, что в ней отсутствует общая объединительная плата, а монтаж и крепление бескорпусных МСБ проводится с двух сторон на одну широкую продольную планку с минимальными зазорами между стыкуемыми МСБ. В верхней и нижней частях ячейки приклеивают печатные вставки с контактными площадками для выводов МСБ, их соединения между собой по схеме и соединения с гибкими шлейфами (в нижней вставке). Монтаж между нижней и верхней вставками проводят микропроводочными жгутами из провода ГФ-100М по 10...16 проводов в каждом жгуте. Жгуты вяжут обычным ручным способом и укладывают в канавки между ребрами жесткости и дополнительными выступами на планке с левого и правого краев рамки. Крепление жгутов осуществляют клеем-мастикой

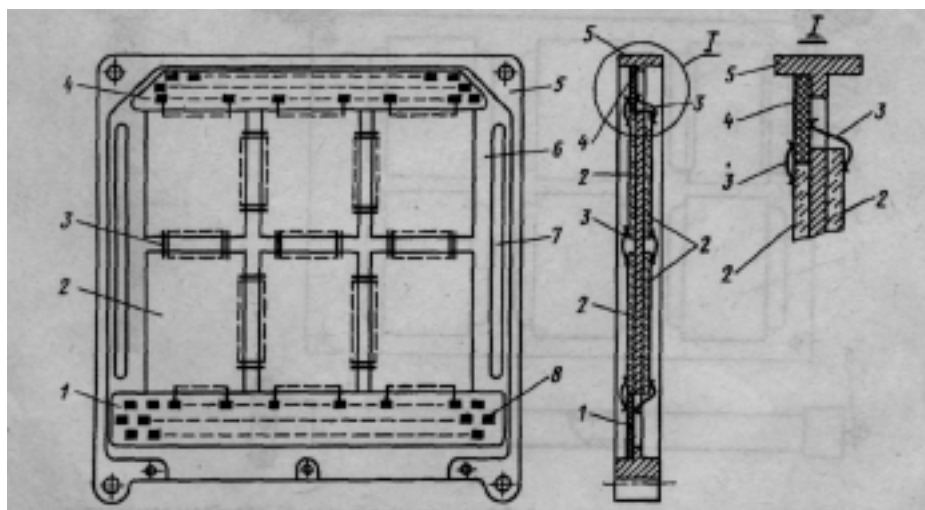


Рис. 3.8. Конструкция двухсторонней ФЯ на металлической рамке: 1 — нижняя печатная вставка; 2 — микросборка; 3 — соединительный проводник; 4 — верхняя печатная вставка; 5 — рамка; 6 — планка; 7 — выступ; 8 — контактная площадка

ЛН. Применение таких конструкций рекомендуют для мелкосерийного производства, так как вязка жгутов плохо поддается автоматизации.

Конструкция двухсторонней ФЯ на металлическом основании представлена на рис. 3.9. Эта конструкция разработана для цифровых РЭС с повышенной плотностью упаковки, поэтому в ней имеется приваренный сверху ячейки воздухопровод коробчатого типа с входным и выходным отверстиями для циркуляции воздуха-охладителя через все ячейки в пакете. Металлическое П-образное основание выполнено из алюминиевого сплава АМг5 методом штамповки — вырубки с последующей гибкой. Толщина листа 0,5...0,8 мм. После гибки между левой и правой частями П-образного основания вставляют многослойную печатную плату из материала ФДМЭ (фольгированного диэлектрика из стеклоткани марки Э) или его заменителей толщиной 3..5 мм и приклеивают ее к основанию. Получается довольно жесткая конструкция, не требующая дополнительных ребер жесткости. На получаемые вырубкой в пластине планки клеют бескорпусные МСБ с двух сторон ячейки, а их монтаж с многослойной печатной платой ведут в «окнах». Для сборки ячеек в книжную конструкцию используют шарнирные соединения, собираемые между собой заклепками. К достоинству конструкции относится технологичность изготовления основания ячейки.

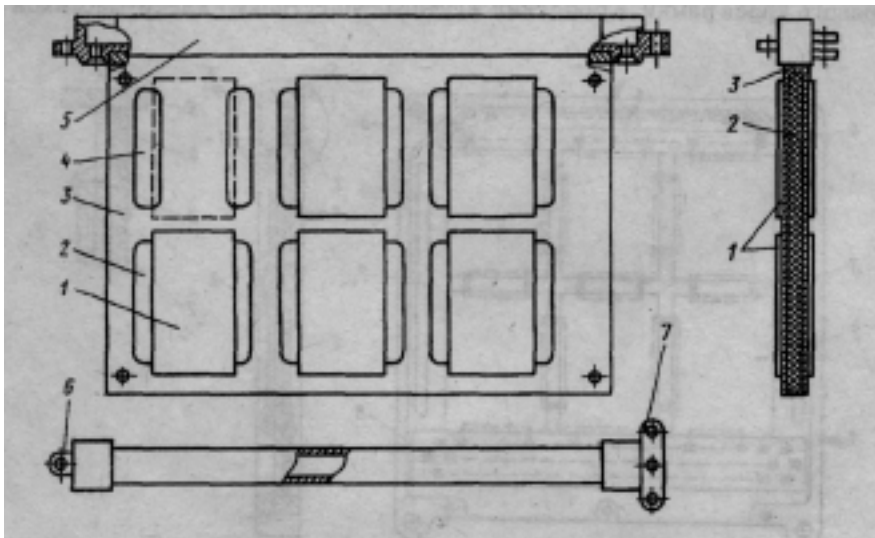


Рис. 3.9. Конструкция двухсторонней ФЯ на металлическом П-образном основании:
 1 — микросборка; 2 — многослойная печатная плата; 3 — основание;
 4 — окно для выводов; 5 — воздухопровод; 6, 7 — шарнирные соединения

Конструкция цифрового блока книжной компоновки представлена на рис. 3.10. Основными сборочными единицами конструкции являются корпус блока, передняя панель с межблочными соединителями и трубкой-штенгелем, крышка, пакет ячеек, установленный на бобышках корпуса, матрица-ремень и децентрализованный блок питания.

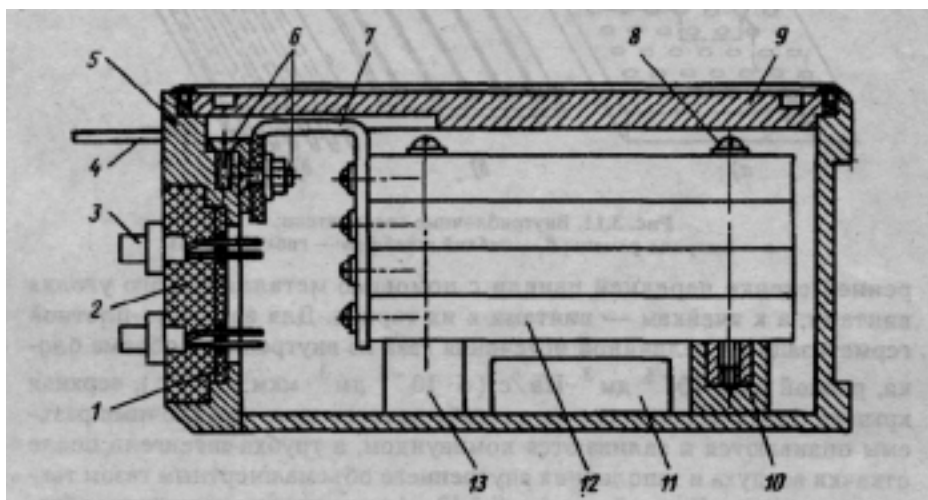


Рис. 3.10. Конструкция блока книжной компоновки IV поколения:
 1 — печатная вставка; 2 — заливочный компаунд; 3 — разъем РПС1;
 4 — штенгель-трубка; 5 — передняя стенка; 6 — винты крепления;
 7 — матрица-ремень; 8 — стяжной винт; 9 — крышка; 10 — титановая втулка;
 11 — блок питания; 12 — функциональная ячейка; 13 — бобышка

Корпус блока выполнен из литейного алюминия АЛ9 с толщиной стенок 3 мм литьем в оболочковые формы с последующей механообработкой. Бобышки изготавливаются при литье, минимальная их высота должна быть не менее 1,5—2 диаметров винта для стягивания ячеек в пакет. Для резьбового соединения винта с телом бобышки в нее запрессовывается титановая втулка с внутренней резьбой под винт. Пакет ФЯ на металлических рамках стягивается винтами, а электрические соединения ячеек с выходными межблочными разъемами типа РПС1 или РСГ осуществляются жгутовым проволочным монтажом, укрепленным в матрице-ремне. Матрица-ремень (рис. 3.11, а) представляет собой сформованную вулканизированную резину с отверстиями диаметром 1,5...2 мм и шагом между ними 2,5 или 5 мм. Через отверстия прошивают жгуты из 10...16 проводников провода ГФ-100М. Ширина ремня определяется шириной зоны коммутации выходных контактных площадок ячейки, а его толщина равна 3...5 мм. Матрица-ремень крепится к внут-

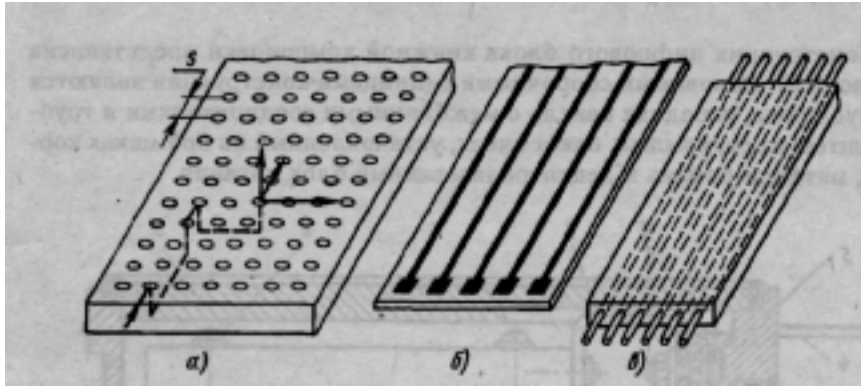


Рис. 3.11. Внутриблочные соединители:
a — матрица-ремень; *б* — гибкий шлейф; *в* — гибкий кабель

ренней стенке передней панели с помощью металлического уголка винтами, а к ячейкам — винтами в их торцах. Для вакуумно-плотной герметизации с величиной истечения газа из внутреннего объема блока, равной $6,65 \cdot 10^{-6} \text{ дм}^3 \text{ Па/с}$ ($5 \cdot 10^{-5} \text{ дм}^3\text{-мкм рт.ст/с}$), верхняя крышка блока запаивается по способу паяного шва, межблочные разъемы опаяваются и заливаются компаундом, а трубка-штенгель после откачки воздуха и заполнения внутреннего объема инертным газом также запаивается. Паяный шов (рис. 3.12, а) выполняют следующим образом: в зазор между крышкой и стенками корпуса и передней панелью укладывают прокладку из нагревостойкой бессернистой резины марки ИРП, далее на нее кладут стальную проволоку диаметром 0,8 мм и весь

шов запаивают по периметру припоем ПОС-61.

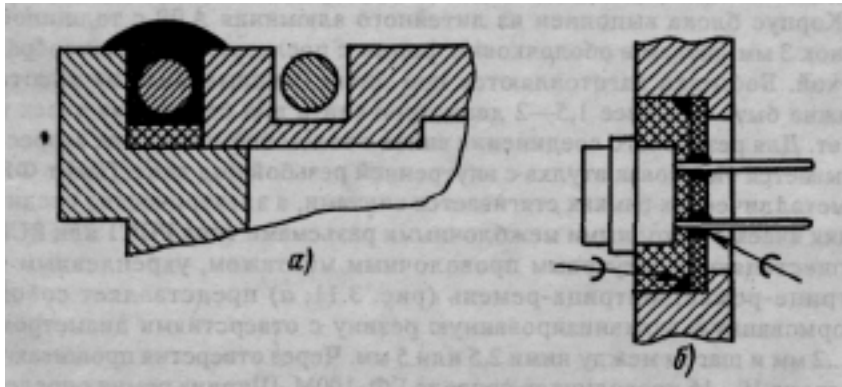


Рис. 3.12. Герметизация блока IV поколения:
a — паяным швом; *б* — заливкой и опайкой

Конец проволоки выводят в канавку стенки рядом с зазором, оставляя его незапаянным. Это нужно для того, чтобы при ремонте блока можно было вырвать из паяного шва проволоку за этот конец и удалить крышку. Ширина зазора составляет 1,2 мм прокладки, а ширина и толщина прокладки — 1,4 мм. Прокладка центрирует крышку при пайке и не позволяет проникать вредным примесям припоя и флюса внутрь корпуса. При такой небольшой величине зазора повторное выполнение паяного шва после ремонта возможно не более двух-трех раз, так как на стенках остаются наросты припоя, которые трудно удалять. Для пайки алюминиевых деталей необходимо их покрытие перед пайкой. Таким покрытием является уже упоминавшееся гальванопокрытие Н5.М12.0-Ви9, которым покрывают места пайки на корпусе и передней стенке. Герметизацию межблочных соединений (рис. 3.12j б) проводят следующим образом: разъем закрепляют на печатной вставке продеванием его выводов через металлизированные отверстия, затем их оплавляют, далее вставку припаивают к стенке передней панели по периметру вставки, на краях которой оставлен залуженный фольговый кант, после чего свободный объем в передней панели заливают компаундом, например ЭЗК (эпоксидным заливочным компаундом). Трубку-штенгель запрессовывают в переднюю панель, оплавляют по контуру цилиндра, затем откачивают воздух, проверяют на герметичность, накачивают сухой азот до избыточного давления 1,3 атм, обжимают, откусывают и запаивают. При такой конструкции трубки для двух-трех повторных ремонтов ее длина должна быть не менее 40 мм. Материал трубки — медь МТ, наружный диаметр — 3 мм.

Поскольку внутриблочные соединения в виде матрицы-ремня занимают до 15...20% объема блока, в настоящее время их выполняют гибкими шлейфами (см. рис. 3.11,б) в виде полосок из гибких фольгированных диэлектриков на основе лавсана (ФДЛ) или полиимида (ФДИ) толщиной 200...300 мкм с печатными прямолинейными проводниками и контактными площадками, а также гибкими кабелями (рис. 3.11,в). Это позволяет уменьшить объем, занимаемый внутриблочными соединениями, в два раза по сравнению с матрицей-ремнем, однако жесткость «переплета» книги ухудшается.

3.4. Конструирование аналоговых субблоков и блоков РЭС

Специфическими особенностями конструкций субблоков аналогового типа, в частности приемно-усилительных трактов (субблоков УВЧ, УПЧ, УНЧ) являются удлиненная форма субблоков, ее планарность и наличие тонкостенных экранов между самими узлами и экранов самих субблоков. При весьма малых по величине сигналах на входе УВЧ (по-

рядка 10^{-6} В) и требуемой величине на выходе УНЧ (десятые доли вольта) необходимо иметь усиление всех трактов свыше 100 дБ, а только в одном УПЧ — порядка 60 и более децибел, что трудно обеспечить на одной промежуточной частоте в малом замкнутом объеме субблока. Поэтому применяют двойное преобразование частоты, располагают каскады в линию и вводят экраны, развязывающие фильтры между ними. — В любом из перечисленных субблоков должны быть частотно-избирательные узлы, селективирующие сигналы, область применения которых поясняет рис. 3.13 [14]. В качестве таких узлов на УВЧ и УПЧ могут использоваться катушки индуктивности (пленочные, каркасные, тороидальные), фильтры упругих и поверхностных волн на пьезоэлектриках, полосовые фильтры на операционных усилителях (активные ЯС-фильтры) и др. Катушки индуктивности пленочного типа имеют малый диапазон индуктивности (от 1 до 10 мкГ) и малую добротность (не более 20); тороидальные катушки могут быть малогабаритными и малой высоты (не более 2...3 мм), однако использование в них ферритов с большой магнитной проницаемостью приводит к значительной температурной нестабильности этой величины, а далее и к нестабильности самой индуктивности и частоты настройки. Каркасные же катушки индуктивности в виде цилиндров с намотанной обмоткой по своим электрическим параметрам не могут иметь конструктивную высоту катушки менее 8...10 мм. Эта высота резко снижает качественные показатели по объему и массе (растут коэффициенты дезинтеграции), и конструкция

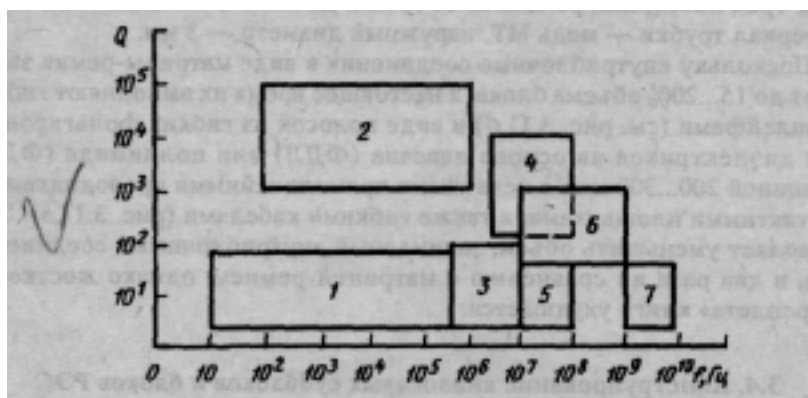


Рис. 3.13. Области применения частотно-избирательных узлов:
 1 — активные RC-фильтры; 2 — цифровые фильтры;
 3 — каркасные катушки индуктивности; 4 — интегральные пьезофильтры; 5 — пленочные катушки индуктивности;
 6 — фильтры на поверхностных акустических волнах;
 7 — микрополосковые фильтры

становится не планарной, а объемной. Наиболее совместимыми по высоте являются фильтры ПАВ и интегральные кварцевые фильтры ($h_k = 3 \dots 4$ мм), которые могут быть размещены в тех же корпусах, что и корпусированные ИС либо скомпонованы в одном корпусе-экране с бескорпусными аналоговыми МСБ, на подложках которых часто размещают навесные конденсаторы серии К10, которые сами имеют высоту 0,6...2,5 мм. Выполнение всех этих требований в конструкциях аналоговых субблоков приводит почти однозначно к пенальной форме субблоков.

Конструктивно аналоговые субблоки III поколения выполняют на печатных платах удлиненной формы с установленными на них корпусированными ИС, обрамляющими их навесными ЭРЭ и частотно-избирательными узлами (каркасными или тороидальными катушками индуктивности, корпусированными пьезофильтрами и т.п.). После сборки и пайки ИС и радиокомпонентов на печатной плате субблок обычно покрывают полиуретановым лаком УР-231, который имеет небольшую диэлектрическую проницаемость (порядка 2,5) и поэтому не вносит значительных дополнений в паразитные емкости между проводниками. Являясь гидрофобным покрытием, он защищает поверхность субблока от проникновения влаги с $\epsilon = 80$, тем самым устраняя не только гидролизные процессы между проводниками, но и защищая субблок от самовозбуждения. В табл. 3.3 приведены наиболее часто встречающиеся в конструкциях аналоговых субблоков корпуса ИС, их геометрические размеры, а также назначение и серии ИС, монтируемых в них. На рис. 3.14 показана условная конструкция субблока III поколения.

Конструкции аналоговых субблоков на бескорпусных микросборках выполняют обычно в виде металлических пеналов, герметизируемых либо по торцам, либо по верхней крышке. Сами МСБ приклеивают на металлическое основание, а монтаж между ними осуществляют либо по принципу «непрерывной микросхемы», либо с помощью печатных вставок между ними и корпусом, на которых устанавливают также навесные ЭРЭ, которые нельзя выполнить в пленочном исполнении. Соединения с другими субблоками осуществляют радиочастотными соединениями типа СР50 и радиочастотными кабелями РК50 или РК75. Низкочастотные цепи питания часто осуществляют через индивидуальные соединители типа «слезка». На рис. 3.15 показана конструкция аналогового субблока, скомпонованного по «непрерывной микросхеме», а на рис. 3.16 — с использованием фильтра ПАВ.

Компоновка аналоговых блоков РЭС зависит прежде всего от их назначения в составе конкретного радиоизделия. Они могут дополнять

Таблица 3.3

Тип корпуса	Серии ИС	Функциональное назначение	Размер ИС, мм		Высота корпуса мм	Масса, г	Число действующих выводов	Шаг установки, мм	
			по оси X	по оси Y				по оси X	по оси Y
301.8-2 3101.8-2	140	Операционные усилители (ОУ);	09,5		4,8	1,6	8	12,5	12,5
301.12-1 3102.12-1	140 171 529	ОУ и аналоговые перемножители; широкополосные	09,5		4,8	1,6	10 12	15,0 17,5	17,5 17,5
201.14-6 2102.16-6	526	УПЧ с детектором	19,5	6,8	5	1,1	9 12 14	22,5 25,0 27,5	15,0 17,5 17,5
238.16-2 2103.16-2	174 544	Аналоговые перемножители; логарифмические усилители; УПЧ;	21,5	6,8	5	1,2 ...2	12 14 16	25,0 27,5 30,0	17,5 17,5 20,0
238.18-3 2104.18-3	174	Многофункциональные схемы	24,5	6,8	3,5	1,5	14 16 18	27,5 30,0 32,0	17,5 20,0 20,0
401.14-3 4102.14-3	175	Детекторы, аналоговые перемножители, дифференциальные усилители	9,8	6,5	3,5	0,35 ... 0,9	10 12 14	123 15,0 15,0	15,0 17,5 20,0

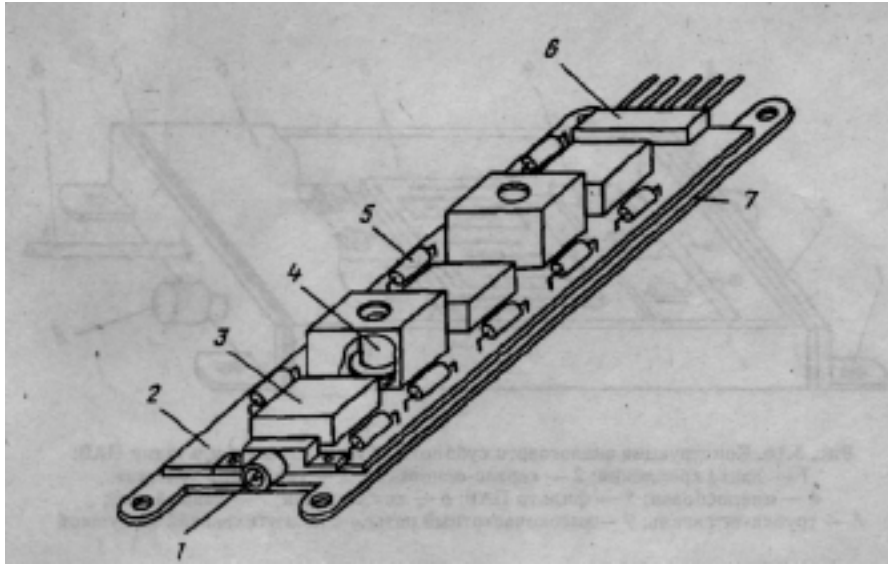


Рис. 3.14. Конструкция аналогового субблока III поколения:
 1 — радиочастотный соединитель; 2 — печатная плата; 3 — корпусированная ИС;
 4 — каркасная катушка индуктивности с экраном; 5 — навесной ЭРЭ;
 6 — низкочастотный соединитель; 7 — основание

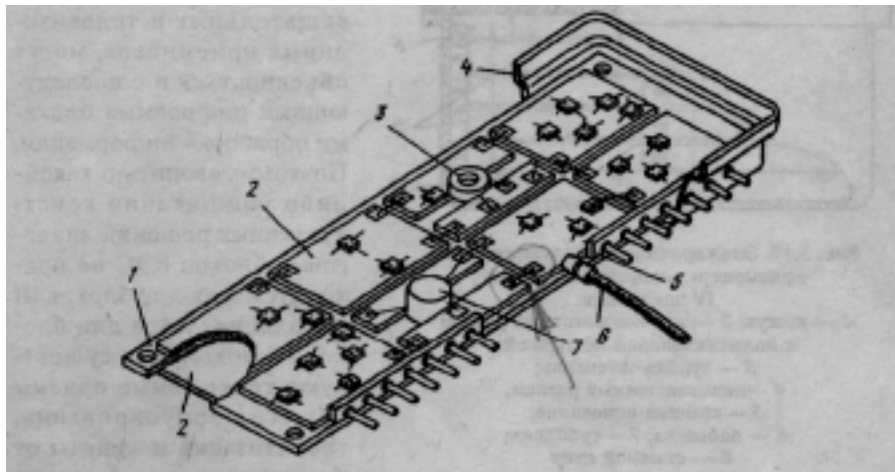


Рис. 3.15. Конструкция аналогового субблока IV поколения
 по «непрерывной микросхеме»:
 1 — металлическое основание; 2 — микросборка;
 3 — тороидальная катушка индуктивности; 4 — корпус-экран; 5 — соединитель;
 6 — радиочастотный кабель; 7 — конденсатор

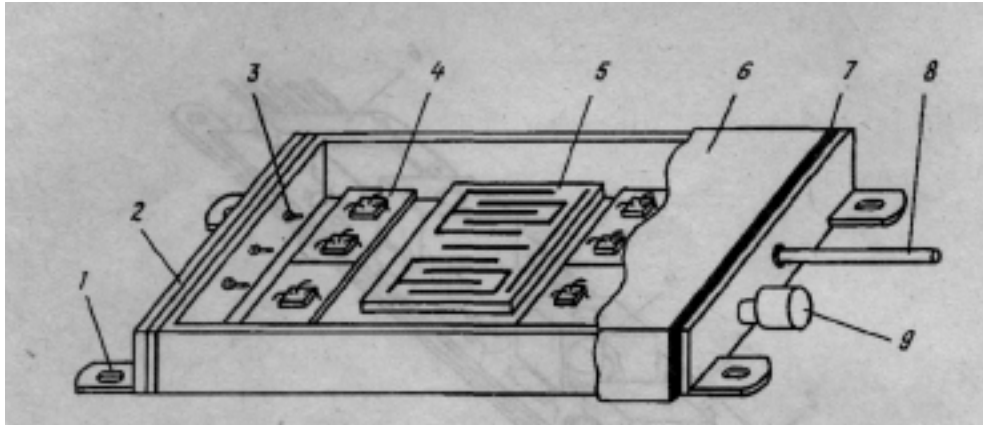


Рис. 3.16. Конструкция аналогового субблока IV поколения с фильтрами ПАВ:
 1 — лапка крепления; 2 — каркас-основание; 3 — гермоввод «слезка»;
 4 — микросборка; 5 — фильтр ПАВ; 6 — кожух-экран; 7 — паяный шов;
 8 — трубка-штенгель; 9 — высокочастотный разъем с полиэтиленовой заглушкой

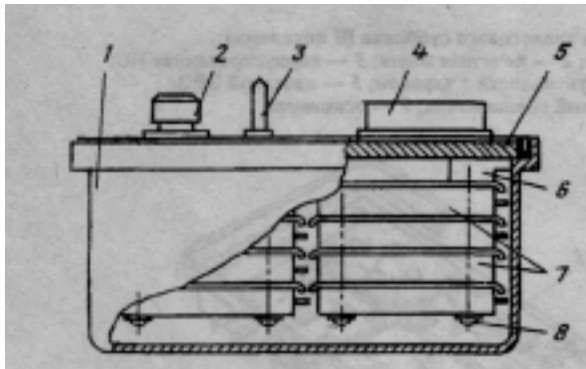


Рис. 3.17. Этажерочная конструкция блока приемопередающего устройства IV поколения:
 1 — кожух; 2 — высокочастотный разъем с полиэтиленовой заглушкой;
 3 — трубка-штенгель;
 4 — низкочастотный разъем;
 5 — крышка-основание;
 6 — бобышка; 7 — субблоки;
 8 — стяжной винт

этажерочная конструкция блока приемопередающего устройства, выполненная на бескорпусных МСБ.

первые каскады СВЧ-устройств, могут быть самостоятельными первыми каскадами в обычных радиовещательных и телевизионных приемниках, могут объединяться и с последующими цифровыми блоками обработки информации. Поэтому говорить о какой-либо унификации кон-

структивных решений аналоговых блоков РЭС не приходится. Как для блоков III поколения, так и для блоков IV поколения существуют те же самые приемы общего корпусирования, герметизации и защиты от факторов внешней среды, что и для цифровых блоков. На рис. 3.17 показана

3.5. Конструирование СВЧ-модулей

Спецификой конструкций объемных модулей СВЧ является принцип «непрерывной микросхемы» на микрополосковых линиях, у которых общая металлизированная поверхность обратных сторон подложек должна быть близка к идеальной («непрерывность общей земли»). На рис. 3.18 показана конструкция модуля СВЧ, входящего в общую конструкцию активной фазированной антенной решетки, т.е. представляющего собой миниатюрный приемо-передатчик с фазовым электронным управлением (сканированием) диаграммы направленности. Микросборки микрополосковых узлов (предварительного усилителя, умножителя, усилителя мощности, смесителя, малошумящего усилителя, переключателя, фазовращателя) выполнены на поликорковых подложках толщиной 0,5 мм, металлизированных с обратной стороны. Весьма важными задачами при конструировании модуля являются выбор способа за-

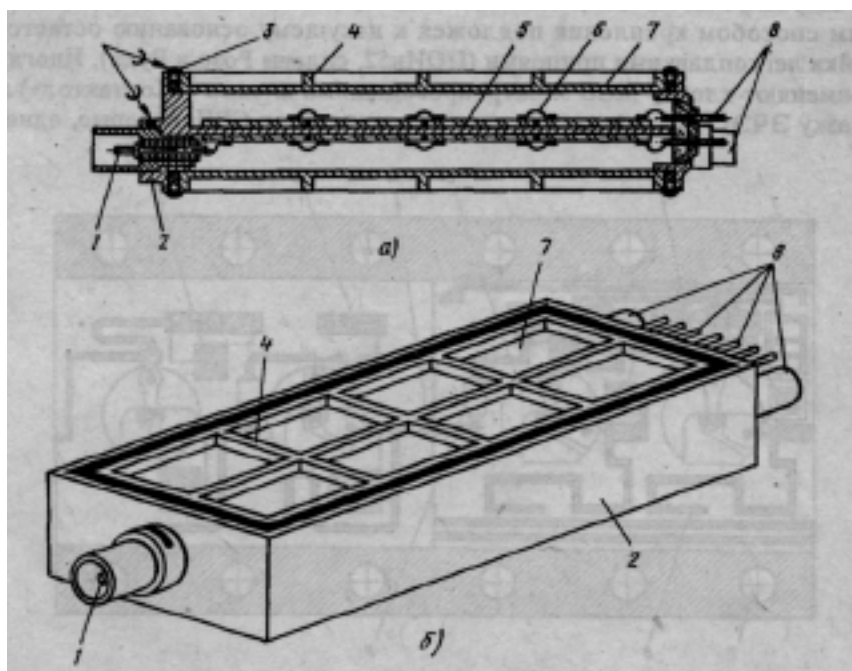


Рис. 3.18. Конструкция модуля СВЧ: *a* — разрез конструкции; *б* — изометрия конструкции; 1 — высокочастотный разъем; 2 — каркас-основание; 3 — паяный шов; 4 — ребро крышки; 5 — планка каркаса; 6 — соединительная перемычка; 7 — крышка; 8 — комбинированный разъем

крепления подложек на несущем основании и вопросы стыковки МСБ по высоте, зазору и сопряжению по ширине микрополосковых линий, а также вопросы экранирования модуля. Выбор поликора в качестве материала подложек объясняется следующими причинами: поликор является высокочастотным материалом и имеет малые диэлектрические потери ($\text{tg } \delta \approx 10^{-4}$); достаточно высокое значение диэлектрической постоянной ($\epsilon = 9,6$) позволяет уменьшить геометрические размеры микрополосковых линий, которые обычно равны либо $0,5 \lambda_d$, либо $0,25 \lambda_d$, где $\lambda_d \approx \lambda / \sqrt{\epsilon}$ λ , — длина волны в свободном пространстве; поликор обладает теплопроводностью в 25 раз выше, чем ситалл, что особенно важно в передающих трактах СВЧ. Микрополосковая несимметричная линия образуется между верхним проводником и обратной металлизированной поверхностью подложки. Чем выше чистота поверхности подложек (двухсторонняя полировка) и чем больше микрополосковых переходов соединено сваркой, а не пайкой, тем меньше потери. Поэтому наиболее надежным способом крепления подложек к несущему основанию остается пайка легкоплавкими припоями (ПОИп52, сплавы Розе и Вуда). Иногда применяют клейку МСБ электропроводящими клеями («Контактол») и смазку ЭЧЭС для приклейки самих транзисторов СВЧ, которые, одна-

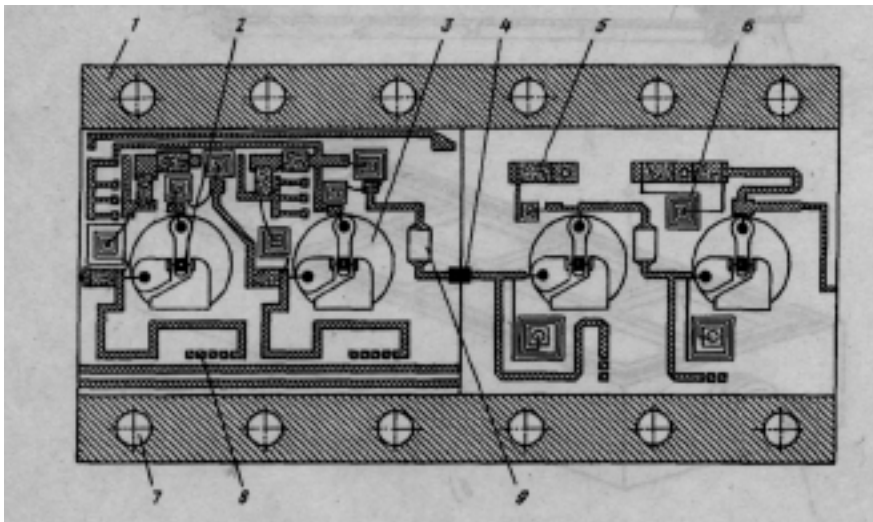


Рис. 3.19. Конструкция передающего СВЧ-модуля:
 1 — металлическое основание; 2 — мощный СВЧ-транзистор;
 3 — бокситовая вставка (шайба); 4 — фольговая перемычка; 5 — конденсатор;
 6 — пленочная катушка индуктивности; 7 — отверстие для крепления;
 8 — шлейф для подстройки; 9 — навесной ЭРЭ

ко, ухудшают условия теплопередачи мощности на корпус, хотя и обеспечивают «общую землю» и лучшую ремонтпригодность. Существует еще и третий способ крепления — прижимы подложек к основанию фторопластовыми винтами. В любом случае поверхность контактирования подложек и корпуса должна иметь электропроводное и легкоплавкое покрытие. Такими покрытиями являются Н5 М12.0-Ви9, Хим 0-Ви3 и ряд гальванопокрытий с серебром и оловом. В модулях СВЧ передающего типа, т.е. с мощными транзисторами, транзисторы припаивают непосредственно к контактам эмиттера, базы и коллектора, размещенным на брокеритовой вставке в виде таблетки, поскольку брокерит-9 имеет теплопроводность, близкую к теплопроводности металлов (рис. 3.19).

Вопросы стыковки микрополосковых узлов приобретают все большее значение с увеличением рабочих частот в гигагерцовом диапазоне [15]. Чем качественнее и точнее обеспечивается совмещение микрополосковых линий в зазоре l , в плане ΔW и по высоте Δh (рис. 3.20, *a, б, в*),

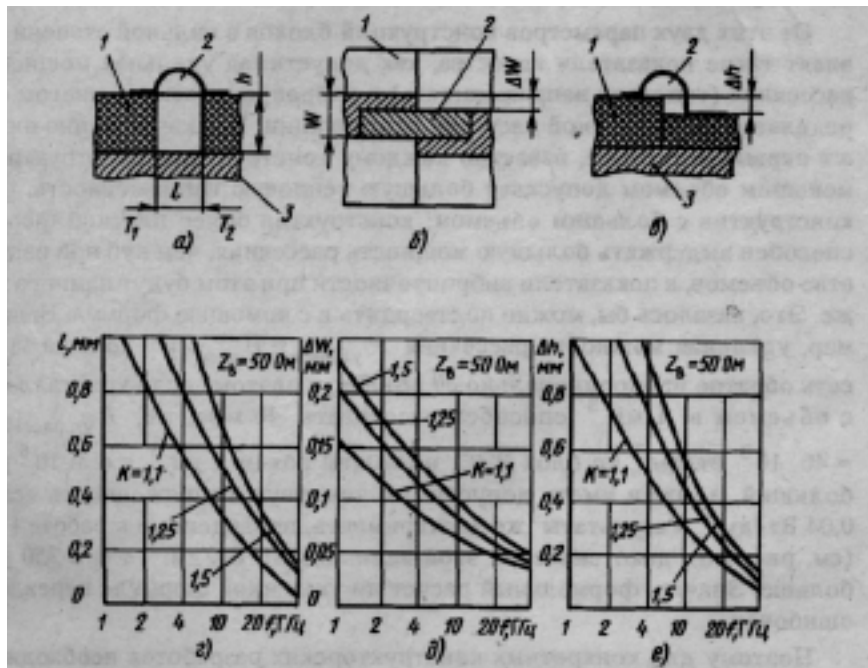


Рис. 3.20. Причины и погрешности геометрической стыковки в микросборках СВЧ при зазоре между ними (*a, г*), при ошибке совмещения МСБ в плане (*б, д*) и по высоте (*в, е*): 1 — микросборка; 2 — соединительная перемычка; 3 — основание-поддон

тем меньше возникает паразитных отражений волн в линии, тем меньше коэффициент стоячей волны K по напряжению и тем выше коэффициент передачи мощности при одинаковом волновом сопротивлении $Z_{\text{в}}$ микрополосковой линии. Так, в сантиметровом диапазоне волн геометрическая стыковка МСБ должна обеспечиваться с точностью ± 100 мкм, а в миллиметровом ± 50 мкм (рис. 3.20, z , d , e).

3.6. Влияние объема и формы блоков РЭС на показатели качества конструкции

В зависимости от назначения, уровня интеграции и объекта установки объем и форма блоков РЭС могут быть различными: объем обычно меняется от одной десятой до нескольких десятков кубических дециметров, а форма может быть плоской, кубической, прямоугольной или цилиндрической.

От этих двух параметров конструкций блоков в сильной степени зависят такие показатели качества, как допустимая удельная мощность рассеяния (тепловая напряженность) и вибропрочность, во многом определяемая собственной частотой конструкции. Как качественно влияют первые на вторые, известно каждому конструктору: конструктив с меньшим объемом допускает большую тепловую напряженность, чем конструктив с большим объемом; конструктив более плоской формы способен выдержать большую мощность рассеяния, чем куб при равенстве объемов, а показатели вибропрочности при этом будут намного хуже. Это, казалось бы, можно подтвердить и с помощью формул. Например, удельная мощность рассеяния $P_{\text{удрасс}} = P_{\text{РАСС}}$ должна зависеть обратно пропорционально от объема, и поэтому если кристалл ИС с объемом в 1 мм способен рассеивать 40 мВт, т.е. $P_{\text{уд РАСС ИС}} = 40 \cdot 10^3 \text{ Вт/дм}^3$, то блок РЭС, имеющий объем 1 дм³, т.е. в 10 раз больший, должен иметь допустимую тепловую напряженность всего 0,04 Вт/дм³. Результаты же эксперимента, приведенные в работе [16] (см. рис. 1.6), дают значение этой величины 10 Вт/дм³, т.е. в 250 раз больше. Значит, формальный расчет по указанной формуле нереален, ошибочен.

Поэтому для конкретных конструкторских разработок необходимо иметь более строгие количественные оценки этого влияния, учитывающие все факторы, в том числе и форму блоков.

Оценим влияние объема блока на удельную мощность рассеяния, считая для простоты выводов форму блока со стороной a_6 кубической.

Изменение стороны куба в k_j раз приведет к изменению его объема в $K^3 j$ раз. Поскольку площадь поверхности куба $S = 6 a^2$, а объем $V = a^3$, то удельная мощность рассеяния

$$P_{\text{уд.расс}} = (\alpha_k + \alpha_l) \Delta t (S/V) = (\alpha_k + \alpha_l) \Delta t (6/a)$$

где a_k, a_l — коэффициенты теплопередачи конвекцией и лучеиспусканием от блока в среду; Δt — перегрев корпуса блока. Если принять какой-либо объем блока за номинальный, например $V_0 = a_0^3$ и по отношению к нему оценить изменение (вариацию) удельной мощности рассеяния B_p при изменении (вариации) объема V_i (k_i раз) для i -го варианта, то такая оценка может быть проведена по следующей формуле:

$$B_p = \frac{(a_k + a_l)_i \Delta t 6 a_{0i}}{(a_k + a_l)_0 \Delta t 6 a_{0i}} = \frac{(a_k + a_l)_i a_{0i}}{(a_k + a_l)_0 a_{0i}} = \frac{(a_k + a_l)_i}{(a_k + a_l)_0} \frac{1}{k_i}$$

где $a_{0i}, a_{0i} = k_i a_{0l}$ — стороны куба для номинального объема и i -го варианта.

С изменением стороны куба (определяющего размера) коэффициент лучеиспускания не меняется; коэффициент конвекции для закона степени $1/4$, как показывают расчеты, меняется незначительно (5...10%), а для закона степени $1/3$ не меняется (разд. 5.3). Поэтому выражение (3.3) можно записать в виде $B_p = 1/k_i$. Зависимость

$B_p = f(B_v)$, где $B_v = V_i/V_0 = k_i^3$, построенная по точкам, представлена на рис. 3.21. Из графика видно, что при изменении объема в 10 раз в сторону увеличения или уменьшения удельная мощность рассеяния, в том числе и допустимая, изменяется лишь в два раза (а не в 10 раз) в обратную сторону. Этим и объясняется ошибка в оценке возможных изменений допустимой тепловой напряженности по общей формуле, так как главным фактором является не сам объем, а отношение площади теплопередачи к объему, т.е. S/V . Поэтому для практических расчетов на рис. 3.22 приведена зависимость этого отношения от объемов блоков РЭС.

Оценим количественное влияние формы блока на удельную мощность рассеяния. Для этого кубическую форму блока будем либо «вытягивать» в столбик, либо «сжимать» в более плоскую (планарную)

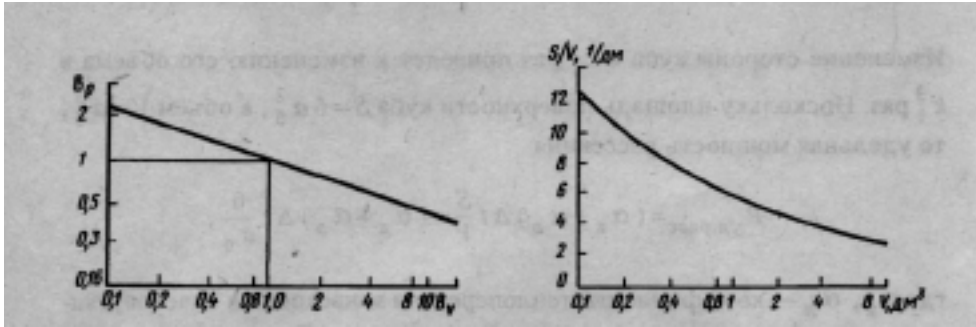


Рис. 3.21. Зависимость вариации мощности рассеяния блока от вариации его объема

Рис. 3.22. Зависимость отношения площади теплоотдачи блока к его объему от объема блока

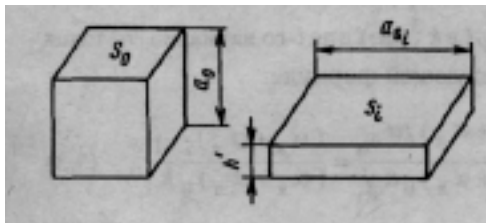


Рис. 3.23. К определению коэффициента планарности конструкции блока

пластину. Вторым случаем на практике более реален, причем пластина может иметь как квадратную, так и прямоугольную формы. Для простоты выводов выберем квадратную форму плоского блока — панель. Введем понятие коэффициента планарности, отражающего степень плоскости

конструкции, как $k_2 = a_0/h'$, где a_0 — сторона куба, h' — высота панели (рис. 3.23). При этом объемы куба и панели равны. Откуда $a_0 S_0 = h' S_i$ и $k_2 = S_i/S_0$. Поскольку $S_i > S_0$, то при увеличении коэффициента планарности должна возрасти допустимая мощность рассеяния в блоке, так как с большей площади теплоотдачи в среду может быть передана большая мощность рассеяния.

Оценим это количественно. Обозначим увеличение стороны верхней грани панели через $k_3 = a_0/a_0$. Тогда общая площадь теплоотдачи панели

$$S_n = 2a_0^2 k_3 + 4a_0 h' = 2k_3 a_0 (k_3 a_0 + 2a_0/k_2) = 2a_0^2 k_3 (k_3 + 2/k_2)$$

Из равенства объемов находим, что $k_3^2 a_0^2 (a_0/k_2) = a_0^3$ и $k_3^2 = k_2$.

Заменив k_3 на k_2 в выражении для площади, получим

$$S_n = 2a_0^2 \left(k_2 + \frac{2}{\sqrt{k_2}} \right)$$

Увеличение удельной мощности рассеяния B'_p

за счет перехода от кубической формы блока к панельной будет равно увеличению площади теплоотдачи этих форм, т.е.

$$B'_p = S_{II} / 6S_0 \frac{1}{3} \left(k_2 + \frac{1}{\sqrt{k_2}} \right)$$

По этой формуле получена зависимость выигрыша в удельной мощности рассеяния (ее вариация B'_p) от степени планарности

формы блоков РЭС (рис. 3.24). Приведенные выше зависимости имеют непосредственное практическое значение при выборе рациональных объемов и формы блоков РЭС.

Пример 3.3. Требуется найти минимально допустимые габариты блока, если известно, что $k_2 = 3$, $\Delta t = 40^\circ\text{C}$ при $t_{\text{max}} = 60^\circ\text{C}$, $\alpha_k + \alpha_{\text{л}} = 0,12 \text{ Вт} / (\text{дм}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $P_0 = 40 \text{ Вт}$.

Принимаем, что 80% потребляемой мощности рассеяния переходит в тепловую энергию, или $P_{\text{расс}} = 32 \text{ Вт}$. Определим допустимую мощность рассеяния для блока кубической формы. Из графика рис. 3.24 для $k_2 = 3$ находим $B'_p = 1,39$, тогда $P_{\text{расс}} = 32 / 1,39 = 23 \text{ Вт}$. Удельная мощность рассеяния в блоке $P_{\text{уд расс}} = 23/V$. Допустимая удельная мощность рассеяния

$P_{\text{уд расс доп}} = 0,12 \cdot 40S/V$. По графику рис. 3.22 методом последовательных приближений находим, что для выполнения условия $P_{\text{уд расс}} = P_{\text{уд расс доп}}$, необходим объем $V = 0,73 \text{ дм}^3$, при котором $S/V = 6,61/\text{дм}$ и $P_{\text{уд расс}} = 31,5$

$\text{Вт}/\text{дм}^3$. Сторона куба равна $a_0 = \sqrt[3]{V} = 0,9 \text{ дм} = 90 \text{ мм}$. Высота блока $h' = a_0/k_2 = 30 \text{ мм}$, а сторона блока a_0 и $= \sqrt{k_2} a_0 = 1,73 \cdot 90 = 156 \text{ мм}$. Искомые (минимально допустимые) габариты блока: 156x156x30 мм. При наличии унифицированных типоразмеров блоков выбирается ближайший типоразмер, при этом стороны верхней грани могут корректироваться таким образом, чтобы ее площадь оставалась примерно постоянной; например, размеры 156x156 мм могут быть заменены на 420x57 мм. Это возможно по той причине, что результаты по расчету B'_p для панелей квадратной и прямоугольной форм мало различаются между собой (кривая 2 на рис. 3.24).

Рассмотрим далее влияние объема и формы блоков на вибропрочность конструкций. Оценка этого влияния может характеризоваться из-

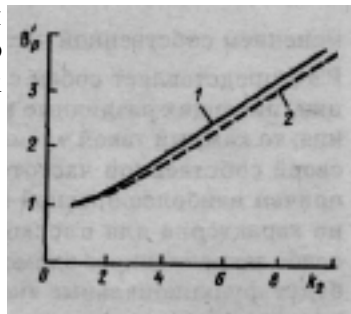


Рис. 3.24. Зависимости вариации мощности рассеяния блока

менением собственной частоты f_0 конструкции блока. Поскольку блок РЭС представляет собой совокупность (систему) элементов конструкции, имеющих различные массы, формы, размеры и способы закрепления, то каждый такой элемент или их сочетание (подсистема) обладает своей собственной частотой механических колебаний при резонансе, причем наиболее опасной из них является самая низкая, которая обычно характерна для плоского, крупноформатного (или массивного) и слабо закрепленного элемента. Наиболее опасными по вибропрочности будут функциональные ячейки и, в частности, их несущие плоские основания (печатные платы, рамки).

В общем случае влияние объема блока РЭС (без амортизации) может быть определено следующим образом: чем меньше объем блока, а следовательно, и его масса, тем выше собственная частота конструкции и ее вибропрочность. Это подтверждается формулой $f_0 = \frac{1}{2p} \sqrt{k/m}$, где

k — жесткость конструкции, а m — ее масса. Однако детально конкретизировать эту зависимость не представляется возможным, поскольку все определяется ФЯ и их жесткостью закрепления. Для одного и того же объема блока варианты ФЯ и их закреплений могут быть самыми различными. Поэтому влияние объема и формы блока на собственную частоту может быть оценено косвенно через размер длинной стороны ФЯ, входящий в основную формулу собственной частоты для пластины:

$$f_0 = \frac{k_m k_b C h 10^4}{a^2} \Gamma \text{ Гц}$$

где k_m, k_b — коэффициенты материала и весовой нагрузки пластины;

C — частотная постоянная, зависящая от формы ячейки и способа закрепления; h и a — толщина и длинная сторона пластины, см.

При изменении объема или формы блока меняется лишь сторона a и

ее отношение к меньшей стороне b , а также количество ячеек. Величины же k_m, k_b, C и h остаются, как правило,

постоянными. Для определения зависимости вариации собственной частоты B_{f_0} от коэффициента планарности рассмотрим по аналогии с предыдущим случаем отношение собственных час-

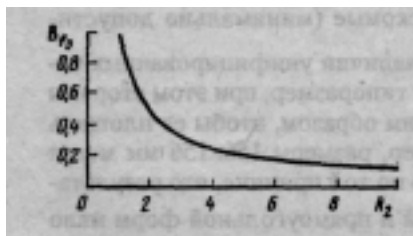


Рис. 3.25. Зависимость вариации собственной частоты конструкции от коэффициента планарности

тот для номинального и i -го вариантов, а именно:

$$B_{f_0} = f_{0i} / f_0 = (a / a_i)^2 = 1 / k_3^2 = 1 / k_2$$

Эта зависимость приведена графически на рис. 3.25.

Пример 3.4. Для блока РЭС на печатных платах из стеклотекстолита ($\rho = 2,47 \text{ г/см}^3$, $E = 33 \cdot 10^9 \text{ Па}$) с объемом, найденным в предыдущем примере, определить допустимое значение коэффициента планарности и габариты блока, если заданы $f_0 = 300 \text{ Гц}$, $h = 1 \text{ мм}$, $k_6 = 0,8$,

$C = 86$ и найдена величина $k_M = 0,72$

Считаем, что блок имеет кубическую форму со стороной $a_6 = 90 \text{ мм}$ (см. пример выше). Сторону квадратной ФЯ принимаем равной $a = 75 \text{ мм}$ (с учетом стенок корпуса и зазора между ними и торцами пакета ячеек). Тогда $f_0 = 0,72 \cdot 0,8 \cdot 86 \cdot 0,1 \cdot 10^4 / 7,5^2 = 880,64 \text{ Гц}$, а $f_0 / f_{0i} = 880,64 / 300 = 2,93$. Таким образом, допустимое значение коэффициента планарности $k_2 \leq 2,93$. В предыдущем примере $k_2 = 3$ и выбраны минимально допустимые размеры блока из условия обеспечения допустимой тепловой напряженности, т.е. блок был более плоским. Однако если учитывать еще и требования вибропрочности, то его размеры можно скорректировать следующим образом:

$$h' = 90 / 2,93 = 30,7 \text{ мм}, k_3 = \sqrt{2,93} = 1,71, a = k_3 a_6 = 154 \text{ мм}.$$

Новые размеры $154 \times 154 \times 30,7 \text{ мм}$ мало отличаются от предыдущих, однако в других случаях, когда k_2 по одному критерию существенно отличается от k_2 по другому критерию, возможны различные варианты габаритных размеров и их оптимизация.

3.7. Выбор оптимальной формы блока РЭС по нескольким критериям качества

Как видно из рассмотренных примеров, выбор формы блока и его коэффициента планарности неоднозначно зависит от рассмотренных двух показателей качества, обеспечивающих его нормальную работу в условиях эксплуатации, и надо выбрать такое значение k_2 , при котором оба условия по ТЗ удовлетворялись бы. Кроме того, при конструировании блоков необходимо подбирать размеры и форму ФЯ таким образом, чтобы размеры отвечали рекомендуемому ряду, например для печатных плат, а форма обеспечивала бы полное заполнение ее площади без «пустых мест». Это требование является дополнительным условием выбора оптимальной формы и в то же время ограничением в выборе вариантов. Другим дополнительным требованием (критерием) является условие получения в конструкции блока возможно большей плот-

ности упаковки элементов в объеме или при выбранной степени интеграции ИС — минимального коэффициента дезинтеграции объема, так как $\gamma_6 = \bar{y}_{ИС} / q_v$ (разд.1,1). Заметим, что чем больше формат ячейки, тем более рационально используется площадь, тем меньше коэффициент дезинтеграции площади, а следовательно, и объема, тем выше плотность упаковки в блоке. Так, например, для одного и того же объема цифрового блока на печатных платах с корпусами ИС типа 401.14-1 были рассчитаны по формулам [5, с. 214] коэффициенты дезинтеграции объема по двум вариантам, когда блок состоял из 27 мелкоформатных ячеек ($q_v = 6,3$) и шести крупноформатных ($q_v = 5,2$). Изменение q_v , а следовательно, и плотности упаковки составило 21%, что весьма существенно, так как объем увеличился на одну пятую.

Таким образом, при выборе оптимальной формы надо учитывать уже четыре критерия при конструировании блоков РЭС на печатных платах. При выполнении блоков на бескорпусных МСБ, как показано в [2], вводятся еще дополнительные критерии, связанные с конструкцией и технологией изготовления рамки.

Возьмем для общего случая конструирования блока РЭС на печатных платах три наиболее важных критерия, а именно: тепловую напряженность, вибропрочность и плотность упаковки, и рассмотрим общий ход решения задачи.

Пусть заданы по ТЗК следующие исходные данные: сложность С РЭС при количестве ИС $7U_{ИС}$, тип корпуса ИС, число задействованных выводов $n_{выв}$, потребляемая мощность микросхемы $P_{ис}$ и допустимая тепловая напряженность блока $P_{уд\ расс\ тз}$, материал и толщина $\Delta_{пп}$ печатной платы, диапазон частот вибраций $f_{min} \dots f_{max}$ и допустимая перегрузка $p_{тз}$, тип компоновочной схемы ФЯ, по которой определяется коэффициент динамичности μ , диапазон температур среды $t_{min} \dots t_{max}$.

Может быть предложен следующий порядок проведения расчетов:

1. По заданной сложности РЭС выбирают пять-шесть вариантов количества ячеек в нем так, чтобы в каждом варианте ячейки не имели свободных мест, т.е. $N_{ИС} = n_x N_y$, где n_x — количество ячеек; N_y количество ИС в ячейке; $N_y = n_x n_y$, где n_x, n_y — количество ИС в строке и столбце (целые числа). При машинном способе расчета может быть выбрано свыше 10 вариантов для получения более плавных графических зависимостей.

2. Рассчитывают требуемые размеры L_x, L_y печатных плат ФЯ для каждого варианта по формулам:

$$L_x = (n_x - 1)t_x + l_x + x_1 + x_2,$$

$$L_a = (n_a - 1)t_a + l_a + a_1 + a_2,$$

где t_x, t_y — шаги установки ИС по осям X и A (выбирают по табл. 3.2, 3.3 в зависимости от типа корпуса и числа задействованных выводов); l_x, l_y — размеры корпуса ИС по справочным данным; x_1, x_2, y_1, y_2 — краевые поля (выбирают по таблицам [17] в зависимости от типа корпуса, толщины печатной платы, типа соединителя и контрольной колодки в ячейке).

3. После расчета L_x и L_y подбирают ближайшие целые значения $L_x' \geq L_x, L_y' \geq L_y$, а далее определяют размеры сторон корпуса блока с учетом добавок $\Delta L_x, \Delta L_y$ на зазоры между пакетом ФЯ и стенками корпуса, толщины самих стенок и размеры для размещения межблочных соединителей, или $A = L_y' + \Delta L_y, B = L_x' + \Delta L_x$.

4. Определяют высоту ячейки $h_{я} = h_c + \Delta_{пп} + h_m$, где h_c — высота соединителя (по справочным данным), $\Delta_{пп}$ — толщина печатной платы, $h_m = 1,5$ мм — размер выступающих выводов ЭРЭ при монтаже на плату.

5. Рассчитывают для каждого варианта высоту пакета ячеек $h_{пак} = n_{я}h_{я} + (n_{я} - 1)h_3$, где h_3 — размер воздушного зазора между ячейками (по верхней зоне установки ЭРЭ и нижней стороне монтажа соседней платы) в пакете.

6. Находят в каждом варианте высоту корпуса блока $H = h_{пак} + \Delta H$, где ΔH учитывает зазоры между пакетом и стенками корпуса и толщины самих стенок корпуса.

7. Рассчитывают объемы корпусов блока $V = A \cdot B \cdot H$ и стороны эквивалентного куба $a_6 = \sqrt[3]{V}$ для выбранных вариантов.

8. Определяют коэффициенты планарности $k_2 = a_6 / H$ и рассчитывают для вариантов плотности упаковки $\gamma_6 = N_{исп} / V$, где n_3 — число элементов схемы в корпусе ИС (берется средневзвешенное для серии или нескольких серий).

9. Определяют для каждого варианта по формуле (3.5) собственные частоты ячеек Q , значения которых подставляют в формулы

$$n_A = (2\pi f_0)^2 A_B / \mu g \text{ и } n_V = 2\pi f_0 v / \mu g, \text{ где } A_B \leq 0,3 \text{ мм}, V_B \leq 800 \text{ мм/с}$$

(условия допустимых вибраций амплитуды и виброскорости для микроскопической аппаратуры); g — ускорение свободного падения (9,81 м/с²). Из рассчитанных значений n_A и n_V берется меньшее n_{min} .

10. Для каждого варианта рассчитываются как для эквивалентных кубов удельные мощности рассеяния в блоках $P_{уд\ РАСС} = 0.8P_0/V$ где

$$P_0 = N_{ИС} \cdot P_{ИС}$$

11. Повторяют с учетом формы блоков находят допустимые удельные мощности рассеяния в блоках по формуле $P'_{уд\ РАСС} = P_{уд\ РАСС}/B'_p$ где B'_p для известных k_2 определяется по (3.4).

12. Для выбранных вариантов строятся зависимости $n_{min} = f_1(k_2)$ $P'_{уд\ РАСС} = f_2(k_2)$ и $\gamma_6 = f_3(k_2)$ в одной плоскости. Там же проводятся линии для $n = n_{тз}$ и $P_{уд\ РАСС} = P'_{уд\ РАСС} \cdot n_{тз}$

13. По представленным графикам определяются возможные значения k_2 , для которых выполняются условия $n_{min} \geq n_{тз}$

$P'_{уд\ РАСС} \leq P_{уд\ РАСС} \cdot n_{тз}$ и обеспечивается более высокое значение плотности упаковки элементов γ_6 в блоке. С учетом гарантии запасов по вибропрочности и тепловой напряженности выбирают конкретное значение коэффициента планарности, т.е. оптимальную форму блока РЭС.

Пример 3.5. Пусть сложность блока РЭС составляет $N_{ИС} = 480$ микросхем серии К531 в корпусах типа 201.14-1 ($l_x = 7,5$ мм, $l_y = 19,5$ мм) с $n_{выв} = 12$, ориентация выводов — горизонтальная ($t_x = 17,5$ мм, $t = 25$ мм). В ячейках применяются печатные платы из стеклотекстолита СФ-1-35-2,0 ($\epsilon_m = 0,72$, $A_{пп} = 2$ мм) и соединитель типа ГРПМ9-30ШУ-1 ($ft_c = 9,5$ мм, $L = 78$ мм, $y_j = 20$ мм); контрольная колодка отсутствует ($x_1 = x_2 = y_2 = 5$ мм). Компоновочная схема ФЯ — односторонняя с заземлением трех сторон ($C = 76$, $\mu = 25$), величина зазора $h_3 = 5$ мм. Среднее число элементов в корпусе микросхем равно $n_э = 30$. Потребляемая мощность $P_{ИС} = 180$ мВт. Коэффициент весовой нагрузки принят $k_v = 0,8$, $\Delta L_x = \Delta H = 10$ мм и $\Delta_1 = 20$ мм. На блок действуют вибрации в диапазоне частот 50 Гц... 1 кГц. Допустимая перегрузка $n_{тз} \leq 2$. Диапазон температур $-10... + 50$ °С, допустимая тепловая напряженность $P_{уд\ РАСС} \leq 13$ Вт/дм³.

Выбираем следующие варианты компоновки блока:

I: $n_y = 20, N_y = 24, n_x = 6, n_y = 4$; **II:** $n_y = 12, N_y = 40, n_x = 8, n_y = 5$;
III: $n_y = 10, N_y = 48, n_x = 8, n_y = 6$; **IV:** $n_y = 8, N_y = 60, n_x = 10, n_y = 6$;
V: $n_y = 6, N_y = 80, n_x = 10, n_a = 8$; **VI:** $n_y = 4, N_y = 120, n_x = 12, n_a = 10$.

Таблица 3.4

Параметр ФЯ (блока)	Вариант					
	I	II	III	IV	V	VI
Размер платы L'_x , мм	105	140	140	175	175	210
Размер платы L'_y , мм	120	145	170	170	220	270
Высота пакета $h_{ПАК}$, мм	355	211	175	139	103	67
Размеры блока:						
длина A , мм;	115	150	150	185	185	220
ширина B , мм;	140	165	190	190	240	290
высота H , мм	365	221	185	149	113	77
Объем блока V , дм ³	5,876	5,47	5,27	5,23	5,017	4,91
Сторона эквивалентного куба a_{σ} , мм	180,4	176,2	174	173,	171,2	170
Частота собственных колебаний f_0 , Гц	608	321	303	270	181	120
Допустимые перегрузки:						
по амплитуде n_l	17,8	4,97	4,42	3,52	1,58	0,7
по виброскорости n_y	12,45	6,58	6,2	5,53	3,7	2,46
минимальная n_{\min}	12,45	4,97	4,42	3,52	1,58	0,7
Коэффициент планарности k_2	0,49	0,8	0,94	1,165	1,51	2,2
Плотность упаковки γ , эл/см ³	2,45	2,63	2,73	2,75	2,87	2,93
Выигрыш в удельной мощности рассеяния B'_p	1,116	1,012	1,001	1,005	1,045	1,184
Удельная мощность рассеяния для куба $P'_{уд РАСС}$ Вт/дм ³	11,76	12,64	13,11	13,21	13,78	14,07
Удельная мощность рассеяния для блока $P'_{уд РАСС}$. Вт/дм ³	10,54	12,48	13,1	13,15	13,18	11,88

Согласно принятому выше порядку расчета и приведенным в нем формулам рассчитаем основные конструктивные параметры различных вариантов и сведем их в таблицу (табл. 3.4). По данным для шести вариантов построим зависимости возможных перегрузок, удельной мощности рассеяния в блоке, плотности упаковки, а также допустимых значений перегрузок и удельной мощности рассеяния от величины коэффициента планарности в этих вариантах (рис. 3.26). По оси абсцисс для каждого варианта указано число ФЯ в пакете. Как видно из графиков, запретными областями, отмеченными штриховкой на границах, в кото-

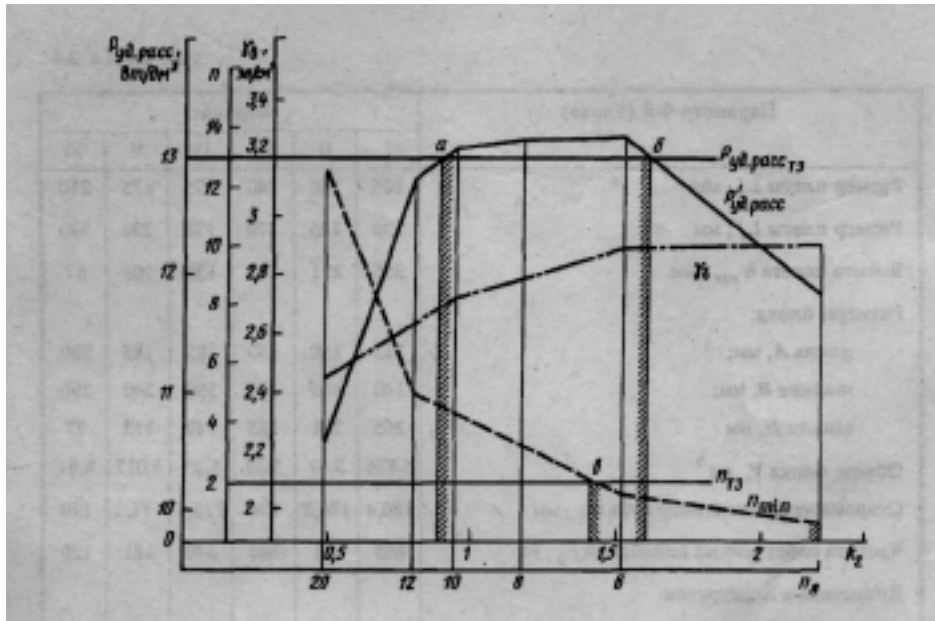


Рис. 3.26. К определению оптимальной формы блока по нескольким критериям

рых не обеспечиваются условия вибропрочности и тепловой напряженности, хотя и достигается в то же время высокая плотность упаковки, являются для $P_{уд\ расс}$ диапазон $0,875 \leq k_2 < 1,6$ и для $n_{min} \cdot k_2 \geq 1,4$. Таким образом, видно, что обеспечение обоих условий по ТЗ может быть выполнено лишь при $k_2 < 0,875$. Ближайшим вариантом к этому значению является II вариант, в котором выполняются также требования полного заполнения площади и достаточной плотности упаковки. При этом размеры печатной платы подбираются под типовые по ГОСТ 10317-78, а именно: $L'_x = 140$ мм, $L'_y = 150$ мм, для которых должна быть проведена корректировка n_{min} , $P'_{уд\ расс}$ и γ_b . Заметим в заключение, что максимум тепловой напряженности в блоке приходится не на форму куба ($k_2 = 1$), а на более плоскую ($k_2 = 1,5$), так как объем блока от варианта I к варианту VI уменьшается за счет уменьшения общей площади краевых полей печатных плат.

3.8. Количественная оценка массы комплекса микроэлектронных средств на ранних стадиях проектирования

В техническом задании на разработку нового изделия РЭС того или иного уровня иерархии наряду с функциональными (электрическими)

параметрами заданы и его материальные параметры, такие как надежность, масса и объем, определяемые тактико-техническими требованиями самого объекта установки РЭС. Эти основные параметры для РЭС летательных аппаратов должны быть строго обеспечены при конструировании. По заданным показателям ТЗ конструктор составляет техническое задание на конструирование (ТЗК) изделия, руководствуясь существующими или перспективными наборами элементной базы и методами компоновки. При этом на ранних стадиях проектирования в качестве рабочих документов у него имеются лишь электрические схемы, габаритные чертежи или чертежи общего вида, по которым возможны прикидочные количественные оценки надежности, потребляемой мощности и объема. Оценка же массы, которая проводится обычным путем по сборочным и детализовочным чертежам, в этот период невозможна, так как эти чертежи отсутствуют. Неопределенность в оценке этого параметра не позволяет конструктору ответить на вопросы, правильно ли выбраны метод компоновки и элементная база и не придется ли их менять в дальнейшем.

Развитие и широкое внедрение в промышленные разработки новой элементной базы и микроэлектронного конструирования позволило путем анализа и обобщения результатов для многих конструктивов микроэлектронных средств получить характерные устойчивые значения коэффициентов дезинтеграции по массе и объему (см. табл. 1.1). На их основе в работе [2] была предложена методика количественной оценки массы комплекса микроэлектронных устройств на этапе технического предложения, которая была апробирована на ряде конструкторских разработок и дала достаточно приемлемые по точности оценки. В основу этой методики были положены следующие принципы:

любой комплекс микроэлектронных средств независимо от его назначения и объекта установки может содержать микроэлектронные устройства и устройства, специфичные по своей конструкции (параболические, рупорные и другие антенны, мощные передатчики на лампах бегущей волны, магнетронах, индикаторные устройства на электронно-лучевых трубках и т.п.);

оценка масс специфичных конструктивов может базироваться на опыте разработок прототипов в зарубежной и отечественной практике или на расчете масс по удельным коэффициентам;

при расчете массы комплекса микроэлектронных средств предполагается известной масса кабельной сети между устройствами комплекса по ее заданной длине и погонной массе;

устройства, выполненные на микросхемах и микросборках, могут содержать определенное число ячеек цифрового, аналогового и силового типов (вторичные источники питания на силовых микросхемах);

каждая микросхема (корпусированная) имеет известное значение массы при заданном типе корпуса; каждая бескорпусная МСБ в зависимости от того, какие функции электрической схемы и какое их число она в себя «вбирает», обладает определенной массой, которая в случае типовой МСБ, например, размером 24x30 мм может быть конкретно рассчитана для цифрового, аналогового и силового типов; если размеры МСБ отличаются от размеров типовой МСБ, но кратны им, то пересчет масс не вызывает затруднений;

общее число микросхем или МСБ и конкретное их содержание в ФЯ разных типов определяется из электрической схемы каждого микроэлектронного устройства; число и массы навесных ЭРЭ, совместимых с микросхемами и МСБ, определяются из перечня элементов и паспортных данных на них;

для пересчета масс микросхем, микросборок и ЭРЭ в массы ФЯ блоков, панелей и микроэлектронных устройств используются известные средние значения коэффициентов дезинтеграции массы от одного уровня компоновки к другому (от микросхем, МСБ к ячейке, от ячейки к блоку или панели, от блока или панели к устройству или комплексу).

Далее приведены порядки расчета массы комплекса РЭС для блочного и моноблочного методов компоновки [10].

Порядок расчета массы комплекса РЭС для блочного метода компоновки

1. По заданной электрической схеме для каждого i -го микроэлектронного устройства проводится его функционально-конструктивное разбиение на g ячеек цифрового, p ячеек аналогового и t ячеек силового типов.

2. По выбранной элементной базе для каждого типа микросхемы (или типовой МСБ) определяется средняя масса, например для цифровой — m_1 , аналоговой — m_2 , силовой — m_3 .

3. Для каждой ячейки i -го устройства определяются из перечня элементов и паспортных данных число комплектующих микросхем (или МСБ) и массы навесных ЭРЭ, например для цифровой ячейки соответственно p и m'_1 , для аналоговой — s и m'_2 , для силовой — t и m'_3 .

Результаты выполнения пп. 1-3 могут быть сведены в табл. 3.5.

4. Рассчитывают активные (полезные) массы микросхем (МСБ) и ЭРЭ, входящих в каждую цифровую, аналоговую и силовую ячейки i -го устройства соответственно:

$$m_{N1} = p m_1 + m'_1; m_{N2} = s m_2 + m'_2; m_{N3} = t m_3 + m'_3.$$

Таблица 3.5

Тип ячейки	Число ячеек	Масса микросхем (МСБ), г	Число микросхем (МСБ) БФЯ	Масса ЭРЭ в ФЯ, г
Цифровая	r	m_1	P	m'_1
Аналогова	n	m_2	s	m'_2
Силовая	l	m_3	t	m'_3

5. Определяют массу пакета ячеек l -го устройства по коэффициентам дезинтеграции массы для выбранных компоновочных схем этих ячеек:

$$m_{\text{пак } l} = q_{m[\text{КТЕ-ФЯ}]}1 m_{N1}r + q_{m[\text{КТЕ-ФЯ}]}2 m_{N2}n + q_{m[\text{КТЕ-ФЯ}]}3 m_{N3}l$$

6. Рассчитывают массу блока i -го устройства с учетом коэффициента дезинтеграции массы в блоке:

$$m_{\sigma i} = q_{m\text{ФЯ-}\sigma} m_{\text{пак } i}$$

7. Находят суммарную массу микроэлектронных блоков с учетом дезинтеграции массы в комплексе (стойке, шкафу):

$$m_{\Sigma} = q_{m_{p-k}} \sum_{i=1}^k m_{s_i}$$

8. Определяют массы специфических конструкций $m_{\text{сп}}$ и кабельной сети $m_{\text{б}}$ по прототипам или рассчитывают по удельным коэффициентам, длине и погонной массе.

9. Находит суммарную массу комплекса РЭС

$$m_{\text{РЭС}} = m_{\Sigma} + m_{\text{СП}} + m_{\text{каб}}$$

Порядок расчета массы комплекса РЭС
для моноблочного метода компоновки (в контейнере)

1. По заданной электрической схеме микроэлектронной части комплекса РЭС проводят функционально-конструктивное разбиение на k панелей.

2. Аналогично изложенному выше определяют средние мас

$m_1, m_2, m_3,$

3. Для каждой i -й панели определяют число микросхем (МСБ) цифрового (p), аналогового (s) и силового (t) типов, а также массу навесных РЭС; заполняют графы табл. 3.5.

4. Рассчитывают активные (полезные) массы микросхем (МСБ) и ЭРЭ, входящих в каждую i -ю панель:

$$m_{Ni} = pm_1 + sm_2 + tm_3 + m_{\text{ЭРЭ}}$$

5. Находят массу i -й панели с учетом коэффициента дезинтеграции массы от уровня микросхем (МСБ) к панели:

$$m_{ni} = q_{m[\text{МСБ-}n]} m_{Ni}$$

где $q_{m[\text{МСБ-}n]} = q_{m[\text{КТЕ-ФЯ}]}$ по табл. 1,1[10]

6. Определяют массу пакета панелей

$$m_{\text{пак}} = \sum_{i=1}^k m_{ni}$$

7. Рассчитывают массу моноблока микроэлектронных устройств с учетом дезинтеграции массы при корпусировании в контейнер:

$$m_{\Sigma} = q_{m[\text{П-К}]} m_{\text{пак}}$$

8. Определяют массы специфичных конструкций $m_{\text{сп}}$ и кабельной сети $m_{\text{каб}}$

9. Находят суммарную массу комплекса РЭС по формуле, приведенной в п. 9 предыдущего порядка расчета.

Пример 3.6. Комплекс РЭС бортового типа содержит: специфичное устройство (зеркальную антенну с приводом) массой $m_{\text{сп}} = 1357$ г, кабельную сеть массой $m_{\text{каб}} = 150$ г, микроэлектронное устройство приема и обработки сигналов, сложность которого определяется 288 цифровыми и 60 аналоговыми интегральными схемами. Блок питания конструктивно выполнен отдельно и имеет массу 150 г. По ТЗ на разработку $m_{\text{РЭС}} \leq 5$ кг. В ТЗ на конструирование необходимо указать рекомендуемый метод конструирования микроэлектронного устройства, его частей и их общую компоновку.

В качестве I варианта выберем метод конструирования на печатных платах с корпусированными ИС. Из цифровых ИС выбираем серию К561 в корпусе 401.14-2 с массой $m_i = 1$ г. В одной двухсторонней цифровой ячейке содержится $p = 36$ микросхем, а всего ФЯ $r = 8$. В ней имеется также по четыре резистора С2-23-0.125 с общей массой 0,6 г и по три конденсатора К53-28 с общей массой 6,4 г, или масса ЭРЭ в цифровой ячейке $m'_1 = 7$ г. Из аналоговых ИС выбрана серия К175 в корпу-

се 401.14-3 с массой $m_2 = 0,9$ г. В одной ФЯ пенального типа размещены $s = 6$ микросхем, а всего аналоговых ФЯ $n = 10$. Каждая микросхема имеет обрамление [9] из трех резисторов С2-23-ОД25 с общей массой 0,6 г, четырех конденсаторов (типы К53-28 и КШ-17 с проволочными выводами) с общей массой 6,4 г и одной тороидальной катушки с массой 3 г. В итоге суммарная масса ЭРЭ в ячейке $m'_2 = 6 \cdot 10 = 60$ г. Полученные данные сведем в таблицу по форме табл. 3.5:

Тип ФЯ	Число ячеек	Масса микросхемы,	Число микросхем в ФЯ	Масса ЭРЭ в ФЯ,
Цифровая	8	1	36	7
Аналоговая	10	0,9	6	60

Из табл. 1.1 определим для выбранных компоновок ячеек и блока коэффициенты дезинтеграции:

$$q_{m[\text{КТЕ-ФЯ}]}=3.2; q_{m[\text{КТЕ-ФЯ}]2}=6.6; q_{m[\text{КТЕ-ФЯ}]3}=1.3$$

Рассчитаем активные массы ячеек: $m_{N1} = 36 \cdot 14 + 7 = 43$ г, $m_{N2} = 6 \cdot 0,9 + 60 = 65,4$ г. Определим массу пакета цифровых ячеек $m_{\text{пак}} = 3,2 \cdot 43 \cdot 8 = 1100,8 = 1,1$ кг, далее массу пакета аналоговых ячеек

$m_{\text{пак}} = 6,6 \cdot 65,4 \cdot 10 = 4316 = 4,32$ кг. Эти два пакета по функциональному назначению удобнее компоновать в виде двух отдельных блоков,

массы которых соответственно будут $m_{\text{б1}} = 1,3 \cdot 1,1 = 1,43$ кг и $m_{\text{б}} =$

$= 1,3 \cdot 4,32 = 5,6$ кг. Эти два блока вместе с автономным блоком питания могут быть скомпонованы в общей ферме, при этом коэффициент дезинтеграции от блоков к комплексу $q_{m[6-1]} = 1,2$. Тогда масса микроэлектронного устройства и блока питания вместе с рамой-фермой составит $m_{\Sigma} = 1,2(1,43 + 5,6 + 0,15) = 8,6$ кг, а масса комплекса $m_{\text{рэс}} = 8,6 + 1,35 +$

$0,15 = 10,1$ кг > 5 кг по ТЗ.

Рассмотрим II вариант — метод конструирования на металлических рамках с бескорпусными МСБ. Для цифровых ячеек примем одностороннюю компоновку с восьмью МСБ размерами 24x30 в каждой ($p = 8$). Каждая МСБ содержит по 12 бескорпусных ИС. Тогда общее число цифровых ячеек $r = 3$. Масса одной МСБ указанного размера из ситалловой подложки $m_1 = 1,1$ г. Общая масса ЭРЭ в цифровой ячейке складывается из тех же элементов, что и ранее, и составляет $m'_1 = 7$ г. В

аналоговых ячейках пенального типа скомпонованы в каждой 5 = 5 микросборок размерами 16х30 мм, а в каждой МСБ имеется по три бескорпусные ИС, откуда число ячеек $n = 4$, Масса одной МСБ $m_2 = 1,7$ г

(с учетом навесных компоненте в). Из навесных ЭРЭ, не устанавливаемых на МСБ, могут применяться либо пьезофильтры, либо тороидальные катушки, массу которых можно принять для одной ячейки $m'_2 = 6$ г. Полученные данные поместим в рабочую таблицу:

Тип ФЯ	Число ячеек	Масса МСБ, г	Число МСБ в ФЯ	Масса ЭРЭ в ФЯ, г
Цифровая	3	1,1	8	7
Аналоговая	4	1,7	5	6

Из табл. 1.1 определим для выбранных компоновок ячеек и блока

$$q_{m[\text{КТЕ-ФЯ}]}=7.7; q_{m[\text{КТЕ-ФЯ}]_2}=11.5; q_{m[\text{КТЕ-ФЯ}]_3}=3$$

Найдем активные массы ячеек: $m_{N1} = 8 \cdot 1,1 + 7 = 15,8$ г; $m_{N2} = 5 \cdot 1,7 + 6 = 14,5$ г.

Определим далее массу пакета ячеек, собранных совместно:

$m_{\text{пак}} = 7,7 \cdot 15,8 + 3 + 11,5 \cdot 14,5 + 4 = 1032 \approx 1,03$ кг. Блок питания может быть собран на силовых МСБ и помещен в общий герметичный моноблок. При этом масса блока питания может быть уменьшена до 50 г. Тогда общая масса микроэлектронного моноблока составит $m_{\delta} =$

$$= 3 \cdot (1,03 + 0,05) = 3,24 \text{ кг, а } m_{\text{РЭС}} = 3,24 + 1,35 + 0,15 = 4,74 < 5 \text{ кг по ТЗ.}$$

Таким образом, для выполнения требования ТЗ по массе необходимо в ТЗК рекомендовать построение микроэлектронной части комплекса в виде моноблока на металлических рамках с бескорпусными микросборками. Поскольку запас по массе практически отсутствует, лучше применять двухстороннюю компоновку цифровых ячеек (см. табл. 1.1).

3.9. Распределение ресурса масс и объемов в конструкциях РЭС

Будем рассматривать конструкцию как совокупность различных по своему назначению элементов и компонентов, объединенных общими связями. Эти элементы и компоненты подразделяются на три основные группы, а именно: полезные (схемные) элементы — группа N, несущие конструкции — группа H, монтаж — группа M. В соответствие с этим делением массу и объем любого конструктива РЭС можно записать как суммы этих величин составляющих групп:

$$m = m_N + m_H + m_M, \quad V = V_N + V_H + V_M + V_B$$

где V_b — объем незаполненных элементами и компонентами конструкции воздушных промежутков. Из приведенных выше выражений, используя общее выражение для удельной массы ($m' = m/V$), можно получить уравнение, отражающее распределение ресурса масс и объемов в конструктиве любого уровня:

$$m' = m'_N \frac{V_N}{V} + m'_H \frac{V_H}{V} + m'_M \frac{V_M}{V}$$

где m'_N, m'_H, m'_M — удельные массы соответствующих групп элементов и компонентов, как правило, отражающие плотности материалов, из которых они выполнены.

Само по себе определение удельной массы конструктива, например блока или ячейки, не представляет особого интереса для сравнения качества конструкции, так как с ростом интеграции ИС доля полезных элементов в общей массе конструкции уменьшается, а доля несущих конструкций и монтажа при существующих методах их изготовления увеличивается. Иными словами, увеличение плотности конструкции достигается не ее компактной компоновкой, а «утяжелением» за счет несущих и монтажных конструкций в общей массе. Это положение подтверждается усредненными результатами проведенного анализа [10] по распределению масс и объемов в современных наиболее компактных конструкциях ячеек и блоков РЭС (табл. 3.6).

Используя данные табл. 3.6 и уравнение распределения ресурса масс и объемов, можно на этапах разработки конструкции более правильно путем расчетов выбрать вид материала несущей конструкции, вид монтажа и компоновочной схемы и др. Покажем это на примерах

Пример 3.7. В цифровой ФЯ на металлической рамке содержится 8 МСБ по 12 ИС в каждой. Требуется выбрать материал рамки. Мощность потребления каждой ИС равна 40 мВт, а мощность рассеяния 32 мВт. Тогда ячейка рассеивает мощность 3,07 Вт. Допустимая мощность рассеяния для ячейки равна 60 Вт/дм³. Тогда объем ее должен быть не менее $V \geq 3,07/60 = 0,051 \text{ дм}^3 = 51 \text{ см}^3$. Масса ячейки по ТЗК не должна превышать 75 г, откуда удельная масса $m' \leq 75/51 = 1,47 \text{ г/см}^3$. Уточним исходные данные: для ситалловых подложек МСБ $\rho_{ст} = 2,6 \text{ г/см}^3 = m'_N$, плотность стеклотекстолита $\rho_{сф} = 2,47 \text{ г/см}^3 = m'_M$, из табл. 3.8 имеем 0,18, $V_N/V = 0,18$, $V_H/V = 0,24$ и $V_M/V = 0,04$. Подставляя эти данные в уравнение ресурса масс, получаем, что

$$m'_H \leq \frac{1,47 - 2,6 \cdot 0,18 - 2,47 \cdot 0,04}{0,24} = 3,76 \text{ г/см}^3$$

Таким образом, для выбора материала рамки рассчитана допустимая (не более) плотность этого материала. Из применяемых металлов можно рекомендовать алюминиевые ($\rho_{ал} = 2,8 \text{ г/см}^3$) или магниевые ($\rho_{мг} = 1,8 \text{ г/см}^3$) сплавы, например АМг, В95, МА8 и др. Выбираем магниевый сплав АМг, тогда $m'_H = 2,8 \text{ г/см}^3$. Определим реальную величину $m' = 2,6 \cdot 0,184 - 2,8 \cdot 0,24 + 2,47 - 0,04 = 1,24 \text{ г/см}^3$, откуда масса ячейки при минимально допустимом объеме будет равна

$$m = 1,24 \cdot 51 = 63,24 \text{ г} < 75 \text{ г по ТЗК.}$$

Таблица 3.6

Конструктив	V_N/V	V_H/V	V_M/V	V_B/V	m_N/m	m_H/m	m_M/m	$m', \text{ г/см}^3$
Двухсторонняя ФЯ на печатной плате с корпусированными ИС	0,14	0,13	0,1	0,63	0,31	0,47	0,22	0,75
Двухсторонняя ФЯ на металлических рамках с бескорпусными МСБ	0,18	0,24	0,04	0,54	0,23	0,69	0,08	0,95
Блок книжной конструкции из ФЯ на печатных платах	0,08	0,11	0,06	0,75	0,24	0,55	0,21	0,5
Блок книжной конструкции из ФЯ на металлических рамках бескорпусными МСБ	0,1	0,2	0,1	0,6	0,15	0,62	0,23	1,15

Пример 3.8. В блоке книжной конструкции из ФЯ на металлических рамках с бескорпусными МСБ необходимо выбрать вид внутри-блочного монтажа: либо матрицу-ремень, либо гибкие шлейфы. Прием условия предыдущего примера: $m' = 1,24 \text{ г/см}^3$, $m'_N = 2,6 \text{ г/см}^3$, $m'_H = 2,8 \text{ г/см}^3$, а также $m'_M = 1,8 \text{ г/см}^3$ (резина, лавсан). Из табл. 3.6 находим $V_N/V=0,1$, $V_H/V=0,2$. Тогда

$$V_M / V \leq \frac{1,24 - 2,6 \cdot 0,1 - 2,8 \cdot 0,2}{1,8} = 0,23$$

При применении матрицы-ремня, как следует из работы [10], объем, занимаемый матрицей-ремнем и печатными платами, составляет 25.. 30%, т.е. $V_M / V = 0,25 \dots 0,3 > 0,23$, поэтому этот вариант не годится и следует выбрать гибкие шлейфы, занимающие 0,1 объема блока.

3.10. Перспективные направления конструирования РЭС

Современный этап развития РЭС характеризуется новыми тенденциями как в радиоэлектронике и вычислительной технике (освоение миллиметрового диапазона волн и компьютеризация), так и в области элементной базы РЭС (появление БИС, СБИС, ССИС, функциональных компонентов). Эти факторы вызывают необходимость в разработке новых принципов и методов конструирования РЭС высокой интеграции, или РЭС V поколения. К таким перспективным направлениям конструирования, частично или уже полностью освоенным за рубежом, можно отнести технику поверхностного монтажа компонентов, методы конструирования на мини-МСБ и интеграции на целой пластине (ИЦП).

Технику монтажа электронных компонентов на плоскую поверхность считают четвертой революцией в электронике (после появления лампы, транзистора и интегральной схемы). Этот метод стал известен с начала 60-х годов в Японии и США, а с начала 70-х годов в Японии был применен для автоматизированного изготовления толстопленочных гибридных ИС. В основу техники поверхностного монтажа положено применение новых миниатюрных корпусов ИС и микрокомпонентов, печатных плат с высокой разрешающей способностью и новой технологии сборки, пайки и контроля. Достоинствами метода являются уменьшение размеров печатных плат на 70% и уменьшение длины сигнальных проводников, что увеличивает быстродействие и помехозащищенность; рост процента выхода годных за счет простоты ремонта и замены неправильно ориентированных компонентов; применение автоматизированных технологий; повышение надежности и снижение стоимости.

Вместе с тем внедрение этой техники сдерживается рядом факторов, таких как большая стоимость автоматизированного оборудования (полностью укомплектованная линия по сборке, пайке, испытаниям и ремонту оценивается в несколько сотен тысяч долларов), трудности совмещения компонентов с посадочными местами и контроля после пайки из-за весьма малых габаритов и шага координатной сетки.

Дадим вначале некоторый краткий обзор [4] элементной базы РЭС для техники поверхностного монтажа. Как известно, основу элементной базы микроэлектронной аппаратуры всегда составляли интегральные схемы. В настоящее время за рубежом разработаны микрокорпуса для ИС широкого применения типа SO (small outline), имеющие число выводов от 4 до 28 типа «крыло чайки» или /-образные (рис. 3.27). Фирма Philips выпускает корпуса SO с 40 и 56 выводами с шагом 0,762 мм при габаритах корпуса 15,5x7,6x2,7 мм, которые по сравнению с отечественным корпусом типа 4104.14-2 имеют в четыре раза больше выводов при тех же

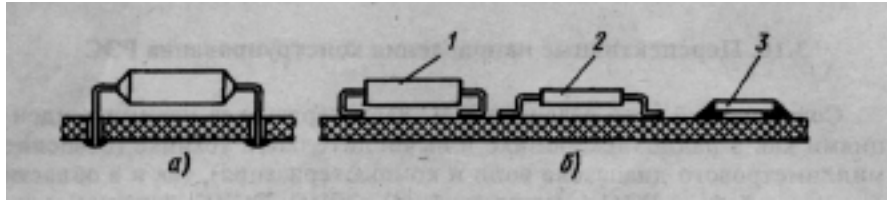


Рис. 3.27. Варианты установки корпусированных ИС и навесных ЭРЭ на печатные платы:

a — по традиционной технологии; *б* — по технологии поверхностного монтажа;
 1 — ИС с J-образными выводами; 2 — ИС с выводами типа «крыло чайки»;
 3 — микрокомпонент с торцевыми залуженными выводами

Таблица 3.7

Характеристика	DIP	SO
Число выводов	14	14
Площадь посадочного места, мм	157	55
Масса корпуса, г	0,9	0,11

габаритах. В табл. 3.7 даны сравнительные характеристики корпусов SO и DIP (аналога отечественного корпуса второго типа 2102).

Выпускаются также кристаллодержатели с /-образными выводами или безвыводные кристаллодержатели, в которых выводы армированы в теле корпуса или выполнены в виде залуженных пазов по четырем сторонам корпуса с внешней стороны. Кристаллодержатель с /-образными выводами, выполненный в пластмассовом квадратном (или керамическом) корпусе при 44 выводах и шаге 1,27 мм имеет габариты 17,5x17,5x3,5 мм, а безвыводный Кристаллодержатель с 84 выводами и при шаге 1,27 мм имеет сторону квадрата 29 мм и высоту корпуса 2 мм. Это в шесть раз меньше по площади и в десять раз меньше по массе, чем корпус типа DIP. Еще более впечатляет корпус фирмы Eхаста, имеющий сравнительно миниатюрные размеры (27x27 мм) при огромном числе выводов (320) и шаге всего лишь 0,3 мм.

Отечественной промышленностью также выпускаются микрокорпуса (рис. 3.28) типа Н, например корпус Н 104.16 с размерами 7,5x7,5 мм при числе выводов 16 (УФ 0.481.005 ТУ). По ОСТ 11.073.924-81 разработаны микрокорпуса, характеристики которых представлены в табл. 3.8.

Шаг между залуженными пазами выводов равен 1 мм, высота выводов 0,4 мм, ширина 0,5 мм.

Вполне очевидно, что при таких малых значениях шага между выводами (до 0,3 мм) и большом их количестве (свыше 84) применение обычных методов установки и пайки на печатных платах просто невозможно. Поэтому для микрокорпусов предусмотрена автоматизирован-

Таблица 3.8

Типоразмер	Размеры корпуса, мм	Число задействованных	Шаг установки, мм	
			по оси X	по оси A
Н 16.48-1	14,5x14,4x2,5	40	16,2	16,2
		48	17	17
Н 18.64-1	18,6x18,6x2,5	56	20,3	20,3
		64	21,3	21,3
Н 20.84-1	23,8x23,8x2,5	76	27,4	27,4
		84	28,4	28,4

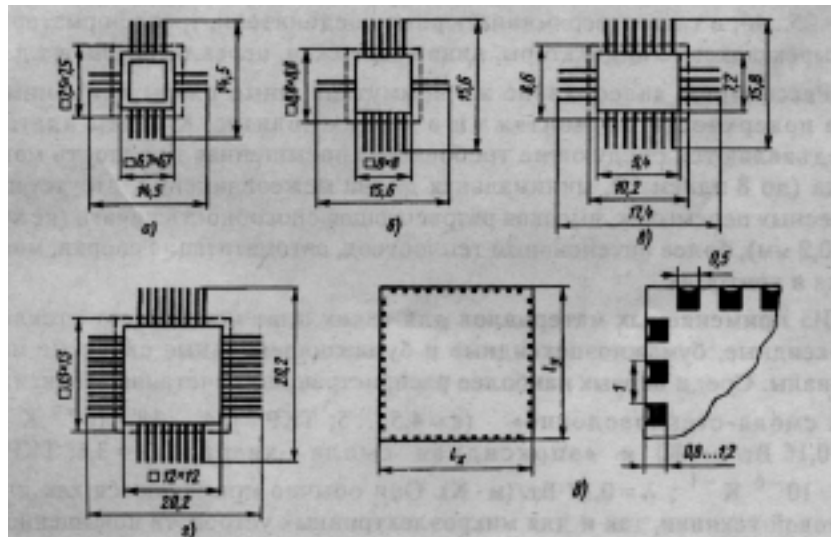


Рис. 3.28. Микрокорпуса: а — Н02.16-1В, б — Н04.16-1В, в — Н06.24-2В, г — Н14.42-2В, д — Н16.48, Н18.64 и Н20.84

ная установка на посадочные площадки с высокой точностью. Среди рекомендуемых методов пайки наиболее приемлемым считается метод расплавленного дозированного припоя (РДП). Плата с приклеенными компонентами помещается в рабочую зону контейнера и предварительно нагревается, затем при подаче насыщенного пара фторосодержащей жидкости плата нагревается до 215°C, пар конденсируется на ее поверхности, отдает тепло, припой расплавляется и образует паяное соединение. За один цикл можно припаять одновременно до тысячи и более ИС на платах, причем качество пайки будет намного выше качества ручной пайки. Другой, менее распространенный, метод расплавленного

дозированного припоя излучением (РДПИ) осуществляется с помощью ламп с вольфрамовой нитью накала ($\lambda_n = 1,2 — 2,5$ мм) в инертной среде во избежание окисления.

Наряду с микрокорпусами ИС применяют микрокомпоненты, такие как непроволочные резисторы с торцевыми площадками для пайки (размеры резисторов $2,06 \times 1,35 \times 0,38$ мм); проволочные трехваттные резисторы с *j*-образными выводами (размеры $21 \times 8,4 \times 6,5$ мм); переменные резисторы массой всего лишь 0,14 г и размерами $5,2 \times 5,2 \times 2,15$ мм; монолитные керамические конденсаторы (аналоги отечественных типов К10-9 и К10-17); многослойные катушки индуктивности из чередующихся слоев магнита и электропроводящих паст с $L = 0,05...220$ мкГ и $Q = 25...45$; а также сверхминиатюрные соединители, трансформаторы, четырехзначные индикаторы, линии задержки, переключатели и т.д.

Рассмотрим далее, какие же коммутационные платы применимы для поверхностного монтажа и в чем их новизна. К таким платам предъявляются следующие требования: повышенная плотность монтажа (до 8 эл/см²), минимальная длина межсоединений, отсутствие навесных перемычек, высокая разрешающая способность печати (не хуже $0,2$ мм), более интенсивный теплоотвод, автоматизация сборки, монтажа и контроля.

Из применяемых материалов для таких плат используют стеклоэпоксидные, бумажноэпоксидные и бумажнофенольные слоистые материалы. Среди первых наиболее распространены сочетания «эпоксидная смола-стекловолокно» ($\epsilon = 4,5...5$; ТКР = $(14...18) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$; $\lambda_n = 0,16$ Вт/(м · К) и «эпоксидная смола—кварц» ($\epsilon = 3,6$; ТКР = $5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$; $\lambda_n = 0,17$ Вт/(м · К)). Они обычно применяются как для бытовой техники, так и для микроэлектронных устройств повышенной мощности.

Ко второй и третьей группам материалов относят термопластики (полисульфон, полиэфиримид $\epsilon = 3$; ТКР = $20 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$; $\lambda_n = 0,16$ Вт/(м · К) и материалы на основе полиимида со стекловолокном $\epsilon = 3,5$; ТКР = $(15 ... 18) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$; $\lambda_n = 0,38$ Вт/(м · К)). Термопластики чаще применяют как прозрачные платы для дисплеев, устройств цветного кодирования, а материалы на основе полиимида — для цифровых устройств с повышенной плотностью монтажа и высоким быстродействием.

Получение рисунка печатных проводников на полиимидных пленках может быть выполнено с шириной проводника 25 мкм и расстоянием между ними 75 мкм полуаддитивным фотографическим методом Photoforming. Другой, не менее интересный, метод называется лазерным экспонированием. В этом случае при нагреве лучом органические смо-

лы с диспергированными частицами меди размягчаются, частицы сплавляются и образуют проводник шириной 120...140 мкм. Третий метод, который разработан и в отечественной промышленности, состоит в изготовлении «рельефных плат» («рельефное тиснение»). Рисунок коммутации наносят через трафарет на проявляющую бумагу и покрывают сверху адгезивом, потом бумагу переворачивают, накладывают на плату и проводят горячую штамповку.

Разновидностью конструктивов с микрокорпусами ИС и микроэлементами являются крупноформатные подложки (КФП), или гигантские микросборки. Их особенность заключается в том, что вместо печатных плат в качестве несущих оснований в них применяют металлические основания (стальные либо алюминиевые размером до 300x400 мм и толщиной 0,5 ...1 мм), на которые в первом случае вжигают многослойную (порядка шести слоев) толстопленочную керамику, а во втором случае наклеивают трассировочную полиимидную пленку (при этом кроме микрокорпусов могут использоваться и бескорпусные БИС на ленте-носителе). Плата также может быть выполнена целиком из керамики Al_2O_3 , но при этом меньших размеров (140x120 мм, толщиной 5 мм и массой порядка 350 г). Применение металлических оснований позволяет обеспечить требуемые вибро- и ударопрочность, теплоотвод и осуществить общую земляную шину.

Однако при разработке КФП встречаются следующие трудности конструкторско- технологического характера, а именно:

- необходимость совместимости материалов держателей ИС и подложки по коэффициенту температурного расширения;

- необходимость согласования плотности межсоединений, в частности контактных площадок с плотностью расположения площадок ввода-вывода на кристаллодержателях и лентах-носителях (шагом их выводов);

- требование надежного теплоотвода от кристаллодержателей и лент-носителей с большим числом активных компонентов (элементов).

В качестве примера решения этих задач и обеспечения высоких технических показателей можно привести конструкцию КФП фирмы Ехаста (Шотландия), получившую название Chipstrate [9]. Основной несущей конструкцией этих КФП является пластина, выполненная из алюминия. На ней крепится шестислойная с эластомером подложка толщиной 0,25 мм с шириной проводников 0,1 мм, на которой монтируются БИС в кристаллодержателях или на лентах-носителях. Амортизирующее свойство верхнего слоя (эластомера) сводит к минимуму риск повреждения паяных соединений, которые могут возникнуть из-за различных КТР материалов подложки и кристаллодержателей. Платы

Chipstrate во многом превосходят гибридные толстопленочные схемы, размер которых ограничен. Первые же могут по своим размерам приближаться к обычным печатным платам. Основные технические характеристики плат Chipstrate в сравнении с обычными печатными платами даны в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Характеристика	Обычная печатная	Плата
Максимальный размер, мм	240x360	152x203
Максимальное число слоев	14	6
Разрешающая способность, мм	0,2	0,1
Минимальный диаметр	0,33	0,1
Теплопроводность	Приемлемая	Хорошая
Выход годных	Средний	Высокий

В конструкциях крупноформатных подложек принят шаг сетки, равный 0,63 мм и менее вместо 1,27 мм для обычных печатных плат, номинальный диаметр отверстий 0,3 мм вместо 0,8 мм, что позволило увеличить плотность межсоединений на 75%. В дальнейших разработках достигнута сверхвысокая плотность межсоединений еще и за счет устранения межслойных отверстий и замены их на сплошные стерженьки путем электролитического осаждения меди. Минимальный диаметр межсоединения при этом равен 0,13 мм. Наличие таких стержневых межсоединений (сплошных и в большом количестве) позволило обеспечить лучший теплоотвод, чем в случае металлизированных отверстий.

В других разработках крупноформатных подложек проблема термического согласования кристаллодержателей и подложки решена за счет применения корпусов кристаллодержателей, выполненных не из керамики, а из стеклоэпоксидных слоистых материалов с малым значением диэлектрической постоянной. Это обеспечивает не только термическое согласование, но и достаточно хорошее быстроедействие за счет уменьшения паразитной емкости между выводами и низкую стоимость корпуса. Метод конструирования МЭА высокой интеграции на крупноформатных подложках осваивается и у нас, но не так широко как за рубежом из-за малого числа серий БИС в кристаллодержателях и на лентах-носителях.

Конструктивы, выполненные на мини-МСБ, внешне мало отличаются от аналогов на микросборках, за исключением их малых масс и объемов и повышенных требований к устойчивой работе.

Мини-МСБ, как известно [9], сочетает в себе все преимущества полупроводниковой и гибридной технологий.

Примером мини-МСБ может служить конструкция схемы управления двигателями в кассетных видеомагнитофонах, разработанной фирмой NEC Corp. (Япония) (рис. 3.29).

В прототипе ранее была одна линейная ИС (ЛИС), три толсто пленочных резистора, шесть мощных транзисторов и один диод, собранные на керамической толсто пленочной гибридной плате. Плата корпусировалась, и корпус герметизировался фенольной смолой.

В новом варианте мини-МСБ схема содержит одну ЛИС, три кристалла (с резистором и мощным транзистором

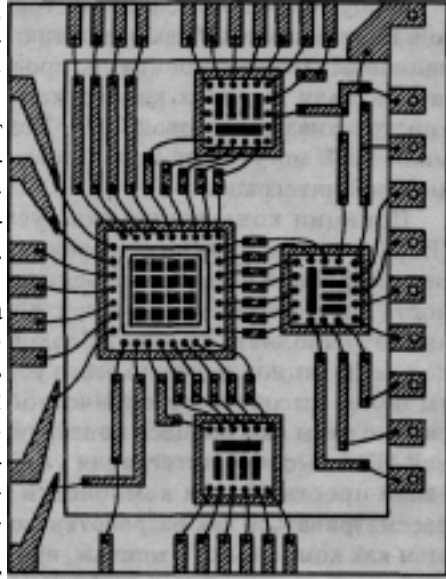


Рис. 3.29. Мини-микросборка

каждый) и четвертый кристалл с тремя транзисторами и одним диодом. Кристаллы и ЛИС развариваются на трассировочной полиимидной плате, укрепленной на выводной рамке. В подобных конструкциях мини-МСБ могут использоваться транзисторные, диодные матрицы, мини-конденсаторы и пленочные резисторы, изготовленные с высокой разрешающей способностью. Причем перенос пассивных элементов с тонко пленочной подложки на кристалл и их изготовление по технологии, близкой к полупроводниковой, уменьшает как число самих кристаллов, так и число операций изготовления, что на 20...30% снижает стоимость изделий.

Для приближения конструкций аналоговых МЭА к идеальным конструктивам в аналоговых ФЯ на мини-МСБ необходимо:

- применять мини-МСБ с ЛИС повышенной интеграции;
- компоновать мини-МСБ по принципу непрерывной микросхемы;
- в качестве частотно-избирательных узлов применять приборы функциональной электроники (фильтры упругих волн и фильтры ПАВ);
- общую трассировочную плату выполнять на-гибком печатном основании — полиимидной пленке, приклеенной непосредственно к дну корпуса-экрана;

корпус-экран выполнять из тонкостенных (не более 0,5 мм) металлов (алюминия с добавками лития, бериллия, реже латуни) или композиционных материалов (фольгированных стеклопластиков) для уменьшения доли несущих конструкций в общем балансе масс и объемов конструктива аналоговой МЭА. Подобные принципы построения ФЯ на мини-МСБ могут быть использованы и при разработке цифровой МЭА высокой интеграции.

Принцип конструирования устройств сверхвысокой интеграции (ИЦП) основан на использовании суперкомпонентов. С развитием микроэлектронной техники уровень интеграции и функциональная сложность ИС стремительно растут, в результате чего эти компоненты начинают выполнять функции блоков и даже подсистем, определяющих в целом функционирование всего устройства. Так появляются компоненты более высокого иерархического уровня, или суперкомпоненты. В связи с этим сам процесс конструирования современной и перспективной МЭА высокой интеграции уже не может рассматриваться как сочетание простых задач компоновки и монтажа компонентов, а должен рассматриваться как разработка самих суперкомпонентов, а в дальнейшем как компоновка и монтаж, причем более сложный, чем в конструкциях предыдущих поколений.

Примером такой разработки конструктива на суперкомпонентах может служить суперинтегральный кристалл фирмы Toshiba (Япония), содержащий микропроцессор Z80, программируемый периферийный интерфейс, программируемый блок ввода-вывода, счетчик (таймер) и логические схемы для тестовой проверки ИС (рис. 3.30). В этой разработке ускорение процесса проектирования мини-блоков достигнуто путем применения стандартных КМОП-кристаллов, которые используют как суперкомпоненты большой гибридной ИС. Для этого берут фотошаблоны уже готовых КМОП БИС и размещают их на одном кристалле, а затем соединяют их электрически между собой вторым слоем металлизации. Для такого суперкомпонента все межсоединения обычно находятся в самих стандартных КМОП БИС, поэтому во втором слое число межсоединений сравнительно невелико. Однако поскольку эти разработки технологически еще недостаточно отработаны, процент выхода годных низок, гибкость автоматизации невелика и стоимость высока. Несмотря на эти недостатки, такой конструктив позволяет сократить срок разработки с 12...16 месяцев для полузаказных ИС до 5...6 месяцев, т.е. более чем вдвое. То же самое происходит со стоимостью: микросборка, в которой применяется суперкристалл, стоит в два раза меньше, чем набор стандартных БИС и логических ИС контроля. Размеры же печатной схемной платы с таким набором при переводе ее на МСБ с суперкристаллом уменьшаются в 5...6 раз. Аналогичный пример можно

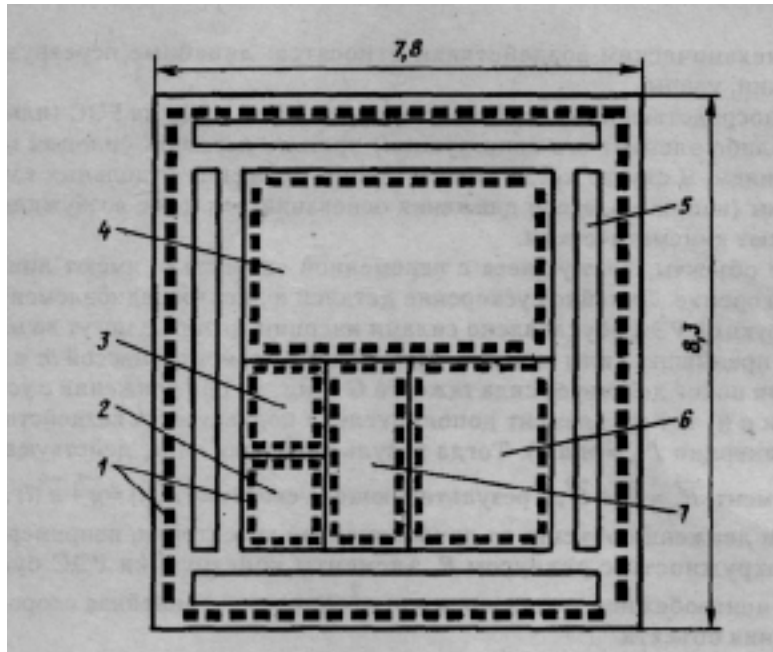


Рис. 3.30. Конструктив на суперкомпонентах: 1 — контактные площадки; 2 — логические ИС; 3 — УВВ; 4 — микропроцессор; 5 — буферные КМДП; 6 — счетчик; 7 — интерфейс

привести и для аналоговой МЭА высокой интеграции. Так, фирма Micro Linear Corp. США разработала и выпустила новую линейную матрицу FB300 [9], в которой схемные компоненты расположены в виде блоков («плиток»), соединяемых на завершающей стадии нанесения рисунка металлизацией.

4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ И ЗАЩИТА КОНСТРУКЦИЙ РЭС

4.1. Классификация механических воздействий

В процессе эксплуатации РЭС подвергаются механическим воздействиям. Характер и интенсивность воздействий зависят от вида источников воздействия и их расположения относительно конструкций РЭС. Наиболее часто источниками механических воздействий являются: окружающая среда, силовые установки объекта, электромеханические устройства с возвратно-поступательно движущимися массами или неравновешенными вращающимися роторами и т.д.

Виброскорость и виброускорение находят в результате дифференцирования (4.1):

$$v(t) = \dot{z}(t) = \omega Z \cos \omega t;$$

$$a(t) = \ddot{z}(t) = -\omega^2 Z \sin \omega t.$$

Виброускорение при гармонической вибрации опережает по фазе виброперемещение на угол π , виброскорость на угол $\pi/2$.

Амплитуды виброперемещения Z , виброскорости ωZ , виброускорения $\omega^2 Z$ и угловая частота колебаний являются основными характеристиками гармонической вибрации. Однако кроме них гармоническую вибрацию можно характеризовать вибрационной перегрузкой

$$n_B = \frac{|a|}{g} = \frac{\omega^2 Z}{g} \quad (4.2)$$

Если в (4.2) амплитуда виброперемещения выражена в мм, а ускорение силы тяжести в $\text{мм}/\text{с}^2$, то соотношение для вибрационной перегрузки можно записать в виде

$$n_B = Zf^2/250,$$

где f — круговая частота вибраций.

Полигармоническая, или сложная периодическая, вибрация может быть представлена в виде суммы гармонических составляющих.

Для случайной вибрации характерно то, что ее параметры (амплитуда виброперемещения, частота и др.) изменяются во времени случайно. Она может быть стационарной и нестационарной. В случае стационарной случайной вибрации математическое ожидание виброперемещения равно нулю, математические ожидания виброскорости и виброускорения постоянны. В случае нестационарных вибраций статистические характеристики не постоянны.

Кроме вибрации, аппаратура может подвергаться ударным воздействиям, возникающим при эксплуатации, транспортировке, монтаже и т.д. При ударе элементы конструкции испытывают нагрузки в течение малого промежутка времени τ , ускорения достигают больших значений и могут привести к повреждениям элементов. Интенсивность ударного воздействия зависит от формы, амплитуды и длительности ударного импульса.

Форма ударного импульса определяется зависимостью ударного ускорения $a(t)$ от времени (рис. 4.1). При анализе ударных воздействий реальную форму ударного импульса заменяют более простой, например прямоугольной, треугольной, полусинусоидальной.

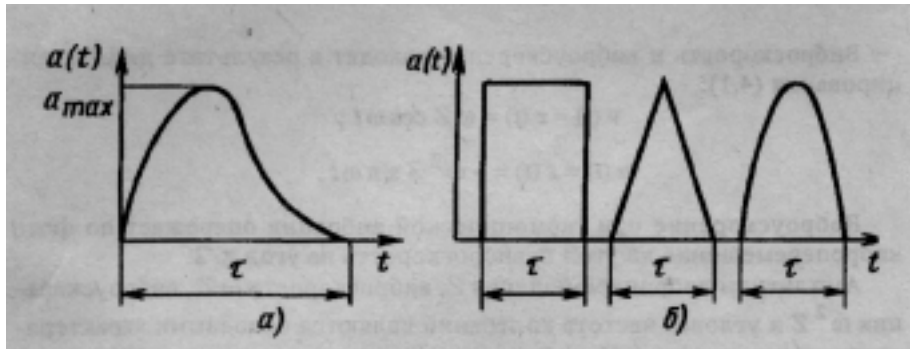


Рис. 4.1. Ударный импульс: а — форма реального ударного импульса;
б — эквивалентные формы

За амплитуду ударного импульса принимают максимальное ускорение при ударе.

Длительностью удара τ называют интервал времени, в течение которого действует ударный импульс.

Последствием удара являются возникающие в элементах конструкции затухающие колебания. Поэтому на практике возникает необходимость в защите конструкций РЭС одновременно от ударов и вибраций. Правомерность такой постановки вопроса обусловлена и тем, что в реальных условиях эксплуатации конструкции могут подвергаться комплексным механическим воздействиям, что должно найти отражение при конструировании средств защиты. Приближенные значения отдельных видов механических воздействий на РЭС, эксплуатируемых на подвижных объектах, приведены в табл. 4.1.

В результате механических воздействий в элементах конструкций РЭС могут происходить обратимые и необратимые изменения.

Обратимые изменения характерны для электрорадиоэлементов и приводят к нарушению устойчивости и ухудшению качества функционирования аппаратуры. В зависимости от физики протекающих в конструкции процессов факторы, вызывающие обратимые изменения, можно объединить в следующие группы:

- деформации в активных и пассивных элементах, приводящие к изменению их параметров (конденсаторы, катушки индуктивности, пьезоэлектрические кварцевые резонаторы, электровакуумные приборы и др.);

- нарушение электрических контактов в разъемах и неразъемных соединениях, вызывающее изменение омического сопротивления контактов;

- изменение параметров электрических, магнитных и электромагнитных полей, которое может привести к нарушению условий электромагнитной совместимости в конструкции.

Таблица 4.1

Название	Уровни механических воздействий						
	Вибрации		Удары			Акустический шум	Линейные перегрузки
	частота	ускорение	ускорение	длительность	частота			ускорения
	с ⁻¹	м/с ²	м/с ²	мс	мин ⁻¹	ДБ	м/с ²
Возимые на транспорте: автомобильном, гусеничном,	4 ... 80 3 ... 30 2... 100	78,5 19,6 19,6	147 147 392	5... 10 5... 10 3... 10	40 ... 80 40 ... 80 40 ... 80	100 100 125	3,12 3,12
Судовые: большие суда, малые суда	4... 100 5 ... 150	78,5 58,9	147 s 147 ;	5... 10 5... 10	40 ... 80 40 ...80	140 140	3,12
Носимые и портативные на открытом	10 ... 70	37	98	5... 10	40 ... 80	85	
Носимые и портативные в отапливаемом	10... 30	10,7	98	5... 10	40 ... 80	85	
Самолетные	5.	1 ... 196	117...736	5... 15		150	
Ракетные	0 ... 500	196,2	981	10...12		170	
Космические	1 ... 2500	4,9 ...59				170	

Необратимые изменения свойственны конструктивным элементам РЭС, связаны с нарушением условий прочности и проявляются в механических разрушениях элементов. Разрушениям под влиянием механических воздействий наиболее подвержены элементы, предварительно нагруженные при их монтаже. Такими элементами являются болты, винты, заклепки в предварительно напряженном (затянута) соединении. Если запас прочности такой детали недостаточно велик, то при дополнительных нагрузках в результате механических воздействий может произойти ее разрушение. Нередки случаи разрушения сварных швов, в которых имеют место остаточные термические напряжения, обрывы объемных проводников, соединяющих радиоэлементы, если при выполнении монтажа проводники получили излишнее натяжение.

К необратимым изменениям, происходящим в конструктивных элементах РЭС при механических воздействиях, относятся усталостные

разрушения. Усталостью называется процесс постепенного накопления повреждений в материале детали под действием переменных напряжений. Механизм этого процесса связан со структурной неоднородностью материала (отдельные зерна неодинаковы по форме и размерам, по-разному ориентированы в пространстве, имеют включения, структурные дефекты). В результате этой неоднородности в отдельных неблагоприятно ориентированных зернах (кристаллитах) при переменных напряжениях возникают сдвиги, границы которых со временем расширяются, переходят на другие зерна и, охватывая все более широкую область, развиваются в усталостную трещину. Усталостная прочность материалов зависит от величины и характера изменения напряжений, от числа циклов нагружения.

Конструкции РЭС, работающие в условиях механических воздействий, должны отвечать требованиям прочности и устойчивости. Согласно ГОСТ 16962-71 под прочностью (вибро- и ударопрочностью) к воздействию механических факторов подразумевается способность конструкций выполнять функции и сохранять значения параметров в пределах норм, установленных стандартами, после воздействия механических факторов.

Под устойчивостью (вибро- и удароустойчивостью) к воздействию механических факторов понимают способность конструкции выполнять заданные функции и сохранять свои параметры в пределах норм, установленных стандартами, во время воздействия механических факторов.

4.2. Моделирование механических воздействий на конструкции РЭС

Конструкция РЭС представляет собой сложную механическую систему, состоящую из бесконечно большого числа материальных точек. Поэтому при исследовании динамических процессов, возникающих в конструкциях в условиях механических воздействий, неизбежен переход от реальных систем к упрощенным абстрактным моделям на основе приближений и допущений. При этом должны учитываться следующие факторы:

- распределение инерционных и упругих характеристик системы и число ее степеней свободы;
- зависимость упругих восстанавливающих сил от деформаций;
- характер сил неупругого сопротивления.

Из механики известно, что число степеней свободы механической системы равно числу независимых обобщенных координат, определяющих положение всех материальных точек системы в пространстве в

произвольный момент времени. Поскольку связи между материальными точками конструкции не абсолютно жесткие, то число степеней свободы конструкции как сложной системы является бесконечно большим. При решении практических задач анализа динамических процессов в конструкциях РЭС реальная механическая система заменяется моделью с ограниченным числом степеней свободы, которое определяется структурой конструкции и требуемой точностью результатов. Применяются два основных вида моделей механических систем: с сосредоточенными массами и связями (упругими и демпфирующими) и с распределенными параметрами.

Так, например, конструкция, совершающая под действием внешней силы колебания вдоль одной координаты, может быть представлена расчетной моделью с одной степенью свободы и сосредоточенными параметрами: массой m , упругой связью с коэффициентом жесткости k и демпфирующей связью с коэффициентом вязкого сопротивления β (рис. 4.2). В то же время, если сосредоточенная масса совершает сложные пространственные колебания, то такую конструкцию обычно представляют расчетной моделью с n степенями свободы (рис. 4.3).

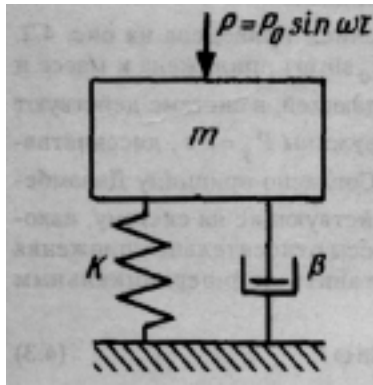


Рис. 4.2. Расчетная модель с одной степенью свободы

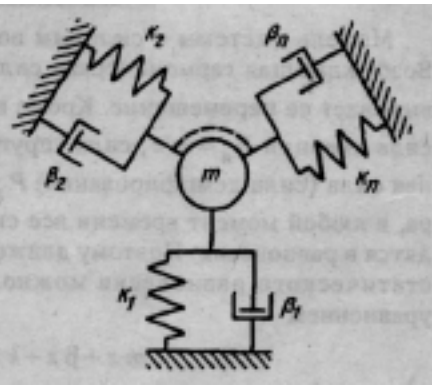


Рис. 4.3. Расчетная модель с n степенями свободы

Расчетные модели с распределенными параметрами используются при исследовании динамических процессов в отдельных элементах конструкции типа балок, стержней и др.

Динамические свойства любой механической системы существенно зависят от характера восстанавливающих и диссипативных сил. В конструкциях РЭС восстанавливающими являются силы упругости, возникающие при деформации элементов. В общем случае зависимость вос-

становливающих сил от смещений нелинейна. Однако при малых деформациях характеристики упругих связей подчиняются закону Гука и зависимость между восстанавливающими силами и смещениями в расчетных моделях систем принимается линейной.

Диссипативные силы (силы неупругого сопротивления) вызывают необратимое рассеяние энергии механических колебаний. К ним относятся силы трения в сочленениях элементов конструкции, силы «внутреннего трения» в материалах, силы аэро- или гидродинамического сопротивления окружающей среды. Действие диссипативных сил приводит к затуханию свободных и ограничению вынужденных колебаний. При построении расчетных моделей механических систем обычно принимают допущение о пропорциональности диссипативных сил перемещению или скорости перемещения (линейная модель).

Проведем анализ динамических процессов в конструкциях РЭС, представленных абстрактными моделями, в условиях воздействий вибраций и ударов.

4.2.1. Вибрационные воздействия на систему с одной степенью свободы

Модель системы с силовым возбуждением приведена на рис. 4.2. Возбуждающая гармоническая сила $P = P_0 \sin \omega t$ приложена к массе и вызывает ее перемещение. Кроме возбуждающей, в системе действуют сила инерции $P_{и} = m \ddot{z}$, сила упругости пружины $P_y = kz$, диссипативная сила (сила демпфирования) $P_{д} = \beta \dot{z}$. Согласно принципу Даламбера, в любой момент времени все силы, действующие на систему, находятся в равновесии. Поэтому движение массы относительно положения статического равновесия можно представить дифференциальным уравнением

$$m\ddot{z} + \beta\dot{z} + kz = P_0 \sin \omega t. \quad (4.3)$$

В результате деления правой и левой частей (4.3) на m уравнение приводится к виду

$$\ddot{z} + 2\delta\dot{z} + \omega_0^2 z = \omega_0^2 z_{CT} \sin \omega t. \quad (4.4)$$

где $\delta = \beta/2m$ — коэффициент демпфирования; $\omega_0 = \sqrt{K/M}$ — круговая частота свободных колебаний; $z_{CT} = P_0/k$ — статический прогиб упругого элемента системы под действием силы P_0 .

Уравнение (4.4) имеет два решения: для свободных и для вынужденных колебаний.

Поскольку параметры свободных колебаний определяются только состоянием самой системы, правую часть уравнения (4.4) полагают равной нулю. Уравнение становится однородным.

Решение уравнения при начальных условиях $\dot{z}(0)=z(0)=0, z(0)=V$ и отсутствии демпфирования ($\delta = 0$) имеет вид

$$z = (v/\omega_0) \sin \omega_0 t = Z \sin \omega_0 t, \quad (4.5)$$

где $Z = v/\omega_0$ — амплитуда свободных колебаний.

Из уравнения (4.5) следует, что свободные колебания протекают на частоте ω_0 , амплитуда колебаний зависит от начальных условий (мгновенной скорости v , сообщенной массе в начальный момент времени). Частота свободных колебаний определяется жесткостью упругого элемента k и массой m конструкции.

Если учесть, что реальным системам присуще затухание $\delta \neq 0$, то решение однородного дифференциального уравнения свободных колебаний дает следующее соотношение для перемещения:

$$z = (v/\omega_0) e^{-\delta t} \sin \omega_1 t, \quad (4.6)$$

где $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ — частота колебаний. Так как $\omega_0 \gg \delta$, то принимают $\omega_1 \approx \omega_0$.

Выражение (4.6) представляет

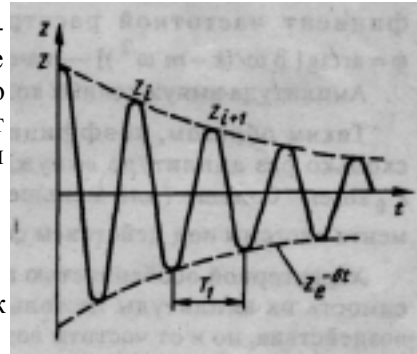
собой затухающее колебание с пери-

одом $T_1 = 2\pi/\omega_1$ (рис. 4.4). Затухание свободных колебаний количественно можно характеризовать логарифмическим декрементом колебаний

$$\lambda = \ln(Z_i/Z_{i+1}) = \ln(e^{-\delta t} / e^{-\delta(t+T_1)}) = \delta T_1,$$

где Z_i, Z_{i+1} — значения предыдущей и последующей амплитуд колебаний соответственно.

Таким образом, свободные колебания в системах существуют непосредственно после внешнего воздействия на отрезке времени, в конце которого множитель $e^{-\delta t}$ и, следовательно, амплитуда перемещения становятся равными нулю.



Вынужденные колебания в системе протекают под действием внешней гармонической силы $P = P_0 \sin \omega t$.

Общее решение уравнения (4.3) может быть представлено в виде суммы решения (4.5) однородного уравнения и частного решения, соответствующего гармонической силе P :

$$z = Z e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t - \varphi_0) + \mu Z_{CT} \sin(\omega t - \varphi). \quad (4.7)$$

Перемещение при вынужденных колебаниях

$$z_B = \mu Z_{CT} \sin(\omega t - \varphi). \quad (4.8)$$

Здесь $m = 1 / \sqrt{4d_0 v^2 + (1 - v^2)^2}$ — коэффициент динамичности системы,

где $\Delta_0 = \Delta / \omega_0$ — коэффициент затухания; $v = \omega / \omega_0$ — коэффициент частотной расстройки или частотное отношение; $\varphi = \arctg [\beta \omega / (k - m \omega^2)]$ — начальная фаза вынужденных колебаний.

Амплитуда вынужденных колебаний $Z_B = \mu Z_{CT}$, откуда $\mu = Z_B / Z_{CT}$.

Таким образом, коэффициент динамичности μ показывает, во сколько раз амплитуда вынужденных колебаний при действии силы $P_0 \sin \omega t$ больше (или меньше) статического прогиба упругого элемента системы под действием силы P_0 .

Характерной особенностью вынужденных колебаний является зависимость их амплитуды не только от параметров системы и внешнего воздействия, но и от частоты возмущающей силы ω . Максимальное значение коэффициента динамичности

$$m_{\max} = 1 / (2d_0 \sqrt{1 - d_0^2})$$

соответствует коэффициенту частотной расстройки $v = (\sqrt{1 - d_0^2})$

Зависимость коэффициента динамичности от частотной расстройки v приведена на рис. 4.5. Если частота возмущающей силы ω совпадает с частотой свободных колебаний ($v = 1$), то возникает явление механического резонанса, при котором амплитуда вынужденных колебаний достигает максимальной величины, а при отсутствии затухания становится бесконечно большой. Поэтому исключение механических резонансов выбором частот свободных колебаний механических систем за пределами диапазона частот внешних вибрационных воздействий — одно из необходимых условий обеспечения вибропрочности.

Модель механической системы с кинематическим возбуждением приведена на рис. 4.6.

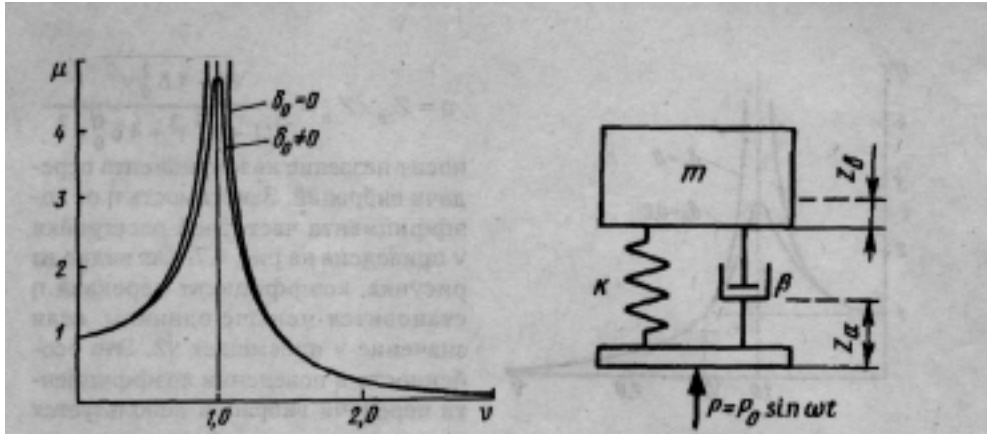


Рис. 4.5. Зависимость коэффициента динамичности от частотной расстройки

Рис. 4.6. Модель механической системы с кинематическим возбуждением

Внешнее вибрационное воздействие $P = P_0 \sin \omega t$ приложено к основанию (платформе), которое перемещается по гармоническому закону $z_a = Z_a \sin \omega t$, где Z_a - амплитуда виброперемещения основания.

Движение системы подчиняется уравнению

$$m\ddot{z} + \beta(\dot{z} - \dot{z}_a) + k(z - z_a) = 0, \quad (4.9)$$

где разность перемещения массы и основания $(z - z_a)$ характеризует упругую деформацию системы.

После подстановки в (4.9) частного решения для вынужденных колебаний (4.8) и выражения для перемещения основания уравнение движения системы приводится к виду

$$(-m\omega^2 + j\omega\beta + k)z = (j\omega\beta + k)z_a$$

откуда находят передаточную функцию

$$F(j\omega) = z/z_a = (k + j\omega\beta) / (k - m\omega^2 + j\omega\beta)$$

и амплитуду колебаний системы

$$Z_B = Z_A \frac{\sqrt{1 + 4d_0^2 v^2}}{\sqrt{(1 - v^2)^2 + 4d_0^2 v^2}}$$

Отношение амплитуд перемещения массы и основания

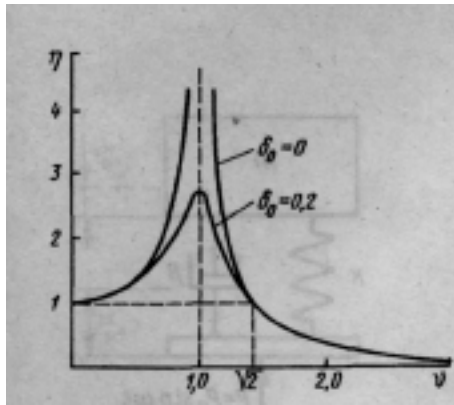


Рис. 4.7. Зависимость коэффициента передачи вибраций от частотной расстройки

$$h = Z_B / Z_A = \frac{\sqrt{1 + 4d_0^2 v^2}}{\sqrt{(1 - v^2)^2 + 4d_0^2 v^2}}$$

носит название коэффициента передачи вибраций. Зависимость η от коэффициента частотной расстройки ν приведена на рис. 4.7. Как видно из рисунка, коэффициент передачи η становится меньше единицы, если значение ν превышает $\sqrt{2}$. Эта особенность в поведении коэффициента передачи вибраций используется для организации виброзащиты конструкций (виброизоляции) с помощью амортизаторов.

4.2.2. Воздействие удара на систему с одной степенью свободы

Анализ ударных воздействий имеет целью определение деформаций и механических напряжений, возникающих в элементах конструкции в зависимости от величины и характера ударных нагрузок. Как отмечалось в разд. 4.1, для упрощения анализа ударные импульсы различной формы приводят к эквивалентному прямоугольному импульсу, используя зависимость

$$a_0 \tau_0 = \int_t^{t+\tau} a(t) dt$$

где a_0 , τ_0 — ускорение и длительность прямоугольного эквивалентного ударного импульса соответственно; a , τ — ускорение и длительность ударного импульса произвольной формы соответственно. Расчеты показывают [25], что для синусоидального импульса (см. рис. 4.1, б) можно принять $a_0 = 0,63a$, $\tau_0 = \tau$, для косинусоидального импульса — $a_0 = 0,5a$, $\tau_0 = 1,27\tau$. Аналогичные соотношения нетрудно получить для трапецеидального и треугольного импульсов.

Наиболее просто удар моделируется падением конструкции с определенной высоты на жесткую платформу. Конструкцию представляют моделью механической системы с одной степенью свободы.

В результате удара возникает колебательное движение массы относительно положения равновесия, соответствующего статическому прогибу упругого элемента под действием силы тяжести (рис. 4.8). Движе-

ние имеет характер свободных колебаний и без учета сил неупругого сопротивления протекает в соответствии с дифференциальным уравнением

$$m\ddot{z} + kz = 0. \quad (4.10)$$

Начальными условиями при этом являются:

при $t = 0$ $z = -z_{CT}$, $\dot{z}(0) = V_0$, где $z_{CT} = mg/K$ — статический прогиб

упругого элемента; $v_0 = \sqrt{2gH_0}$

начальная скорость перемещения; H_0 — высота падения конструкции.

Решение уравнения (4.10) для перемещения массы получают в виде

$$z(t) = (v_0/\omega_0)\sin\omega_0 t - z_{CT}\cos\omega_0 t, \quad (4.11)$$

где $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ — частота свободных колебаний. Из (4.11) можно найти максимальное перемещение массы

$$z_{\max} = \sqrt{z_{CT}^2 + (v_0/\omega_0)^2}$$

и полную (динамическую) деформацию упругого элемента

$$z_{\text{д}} = z_{CT} + z_{\max} = z_{CT} \left(1 + \sqrt{1 + v_0^2 / \omega_0^2 z_{CT}^2} \right) = \mu z_{CT},$$

где μ — коэффициент динамичности конструкции.

Жесткость k и полная деформация упругого элемента определяют эквивалентную силу удара $P_{\text{уд}} = kz_{\text{д}} = mg\mu$. При известной силе удара $P_{\text{уд}}$ можно найти напряжения, возникающие в упругом элементе конструкции.

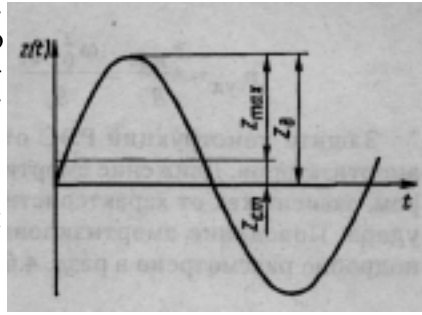
Чтобы оценить перегрузки элементов при ударе, из соотношения (4.11) находят ускорение

$$\ddot{z}(t) = -v_0 \omega_0 \sin \omega_0 t + z_{CT} \omega_0^2 \cos \omega_0 t.$$

Максимальное значение ускорения

$$\ddot{z}_{\max} = \omega_0^2 z_{CT} \left(\sqrt{1 + v_0^2 / \omega_0^2 z_{CT}^2} \right)$$

определяет перегрузку при ударе:



$$h_{вд} = \frac{\dot{z}_{\max}}{g} = \frac{w_0^2 z_{СТ}}{g} \sqrt{1 + V_0^2 / w_0^2 z_{СТ}^2} \approx \frac{V_0 w_0}{g}$$

Защита конструкций РЭС от ударов осуществляется с помощью амортизаторов. Движение амортизированной системы, вызываемое ударом, зависит как от характеристик самой системы, так и от параметров удара. Поведение амортизированных систем при воздействии удара подробно рассмотрено в разд. 4.6.

4.3. Расчет показателей вибропрочности конструкций РЭС

Исходя из определения вибропрочности и анализа динамических процессов, протекающих в элементах конструкций РЭС при вибрациях, можно определить следующие условия обеспечения вибропрочности:

отсутствие в конструкции механических резонансов;

ограничение амплитуды виброперемещения и виброскорости значениями, исключая опасные напряжения и усталостные явления в элементах конструкции;

допустимые значения виброперегрузок в диапазоне частот внешних воздействий должны превышать величины, определенные техническим заданием на разработку конструкции РЭС.

Первое условие выполняется, если частота свободных колебаний элементов конструкции лежит за пределами диапазона частот внешних воздействий. Ввиду того, что частота свободных колебаний $w_0 = \sqrt{k/m}$, где k — жесткость элемента конструкции; m — масса, для снижения массы конструкции приемлемым является решение: $w_0 > w_v$ где w_v верхняя граница диапазона частот внешних воздействий.

Проверка выполнения условия прочности конструкции при вибрации производится на основе приведения динамической задачи к статической [52]. Для этого необходимо найти коэффициент динамичности конструкции μ и нагрузку, которая возникает в элементах конструкции:

$$P = mg\mu n_v,$$

где m — масса элемента конструкции; g — ускорение свободного падения; n_v — вибрационная перегрузка элемента при резонансе. Затем по формулам сопротивления материалов следует определить допустимое напряжение, которое может выдержать элемент в течение заданного срока эксплуатации:

$$\sigma_{\text{доп}} = \sigma / n.$$

где σ — предельное значение напряжения (предел прочности) для материала; n — запас прочности.

Запас прочности обычно устанавливают на основе так называемого дифференциального метода в виде произведения частных коэффициентов: $n = n_1 n_2 n_3$, где $n_1 = 1, 2 \dots 1, 5$ — коэффициент достоверности определения расчетных нагрузок и напряжений; $n_2 = 1, 0 \dots 1, 5$ — коэффициент, учитывающий степень ответственности детали; $n_3 = 1, 2 \dots 3$ — коэффициент, учитывающий однородность механических свойств материалов.

В случае изгибных деформаций напряжение на изгиб

$$\sigma_{\text{и}} = M_{\text{и}} / W_{\text{и}} \sigma_{\text{идоп}},$$

где $M_{\text{и}}$ — изгибающий момент в наиболее опасном сечении элемента конструкции; $W_{\text{и}}$ — момент сопротивления при изгибе.

Усталостные разрушения характерны для циклических нагрузок на высоких частотах вибраций и обычно наблюдаются при резонансных колебаниях радиоэлементов. Чаще всего разрушаются выводы радиоэлементов, так как механические напряжения в определенных сечениях выводов (область изгиба и соединения с контактными площадками коммутационных плат) при вибрациях на резонансной частоте резко возрастают. Если известно максимальное циклическое напряжение в выводах, то по кривой усталости для материала можно определить число циклов до разрушения и, таким образом, составить прогноз долговечности изделия. Количественной оценкой долговечности служит время работы элемента до разрушения выводов

$$t_p = N_p / f_{01}.$$

Где N_p — число циклов нагрузки до разрушения; f_{01} — частота свободных колебаний основного тона элемента.

Связь между виброперегрузкой n_v , частотой ω и амплитудой вибраций Z определяется выражением (4.2). Если исходя из допустимых напряжений, возникающих в материале элемента конструкции, положить ограничение на амплитуду вибраций, то получим предельное значение виброперегрузки:

$$n_{\text{в.доп}} \leq \frac{w^2 Z_{\text{доп}}}{g} \quad (4.12)$$

Выразив виброперегрузку через виброскорость V , можно найти допустимое значение виброперегрузки при ограничении на виброскорость

$$n_{в.доп} \leq \frac{w V_{доп}}{g}$$

Условие вибропрочности конструкции выполняется, если

$$n_{в.доп} \geq n_{в.тз}$$

Проверку неравенств (4.12) и (4.13) целесообразно проводить или на нижней частоте вынужденных колебаний или на резонансной частоте, где амплитуда вибраций и виброскорость достигают больших значений. Так, например, при низкочастотных вибрациях ($f = 5 \dots 50$ Гц) для $n_{в} = 4$ амплитуда вибраций лежит в пределах $40 \dots 0,4$ мм и изгибные деформации могут вызвать разрушение элемента конструкции. На частоте вибраций 1000 Гц при прежнем значении виброперегрузки амплитуда вибраций $Z = 1$ мкм. Однако вследствие большого числа циклов колебаний могут возникнуть усталостные явления в материале.

Таким образом, оценка вибропрочности конструкций РЭС производится по следующим показателям:

частоте свободных колебаний ω_0 ;

допустимому значению напряжения $\sigma_{доп}$ в материале элементов

конструкции и предельному числу циклов нагружения N_p ;

допустимому значению виброперегрузки $n_{в.доп}$.

При расчете частот свободных колебаний элементы конструкций РЭС заменяют эквивалентными расчетными моделями, для которых получены аналитические соотношения, связывающие частоту свободных колебаний с параметрами модели. Основным условием замены является соответствие модели реальной конструкции и минимальное число степеней свободы. Так как резонансные явления могут возникнуть на всех структурных уровнях конструкции, то желательно определять частоты свободных колебаний радиоэлементов, узлов, субблоков и т.д. При этом в зависимости от способа монтажа радиоэлементы могут заменяться расчетными моделями балки или рамы, в качестве расчетных моделей функциональных узлов и других планарных конструкций используется модель пластины.

4.3.1. Расчет частоты свободных колебаний радиоэлементов

Согласно [63] при конструировании узлов РЭС на печатных платах применяется ряд вариантов установки радиоэлементов. Воздействию

вибрации в большей степени подвержены радиоэлементы, установленные по вариантам, не предусматривающим механического соединения корпуса с платой. Поэтому в первую очередь рассмотрим примеры построения расчетных моделей для таких радиоэлементов.

На рис. 4.9, а показана установка радиоэлемента по варианту П. Расчетными моделями данной конструкции могут служить: балка с шарнирным или жестким закреплением на концах (рис. 4.9, б, в) и рама (рис. 4.9, г). Длины балки и горизонтальной связи рамы l определяются длиной выводов радиоэлемента от корпуса до изгиба. Корпус элемента моделируется сосредоточенной массой m .

Транзистор и конденсатор, установленные на плате по варианту В (рис. 4.10, а, б), и радиоэлементы, установленные по варианту III (рис. 4.10, в), заменяются расчетными моделями в виде балки, жестко закрепленной с одного конца, с сосредоточенной массой на свободном конце (рис. 4.10, г). Длина балки l равна длине выводов от платы до корпуса радиоэлемента.

Расчетной моделью радиоэлемента, смонтированного по варианту IV (рис. 4.11, а), является балка, жестко закрепленная с двух сторон (рис. 4.11, б).

Если корпус радиоэлемента закрепляется на плате (рис. 4.12, а, б), то анализ динамических процессов при вибрации может быть выполнен по расчетным моделям в виде рамы или арки (рис. 4.12, в, г).

В условиях внешних механических воздействий в элементах конструкций РЭС, приводимых к модели балки, возникают продольные, крутильные и изгибные колебания. Однако жесткость балки на изгиб, как правило, бывает ниже жесткости на растяжение и кручение. Поэтому для практики расчет изгибных колебаний представляет наибольший интерес.

Схема нагружения балки с шарнирным закреплением концов приведена на рис. 4.13, а, где приняты следующие обозначения: $q = m\ddot{z}/l$ — распределенная нагрузка балки, m — масса, \ddot{z} — виброускорение, l — длина балки, $z(x, t)$ — максимальный прогиб балки при вибрации. На

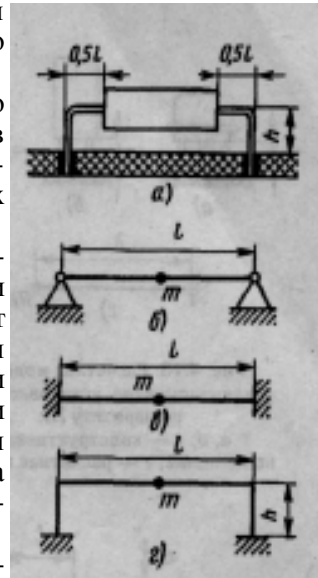


Рис. 4.9. Расчетные модели радиоэлемента, установленного по варианту П: а — установка радиоэлемента на печатной плате; б, в — расчетные модели в виде балки; г — расчетная модель в виде рамы

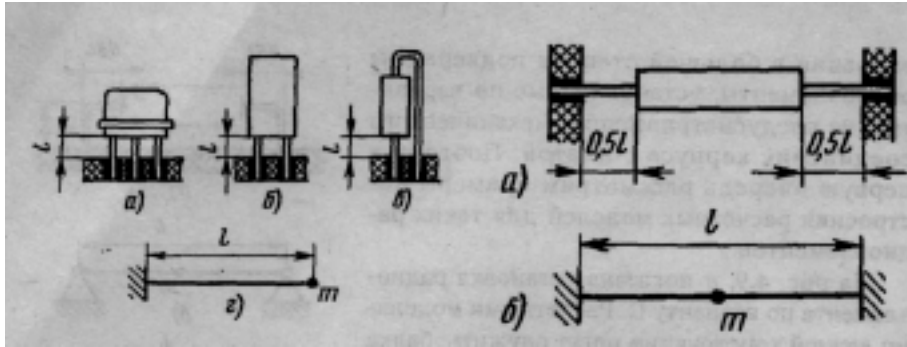


Рис. 4.10. Расчетная модель радиоэлементов, установленных по варианту III:

a, б, в — конструктивные исполнения; *г* — расчетная модель

Рис. 4.11. Расчетная модель радиоэлемента, установленного по варианту IV:

а — установка радиоэлемента; *б* — расчетная модель

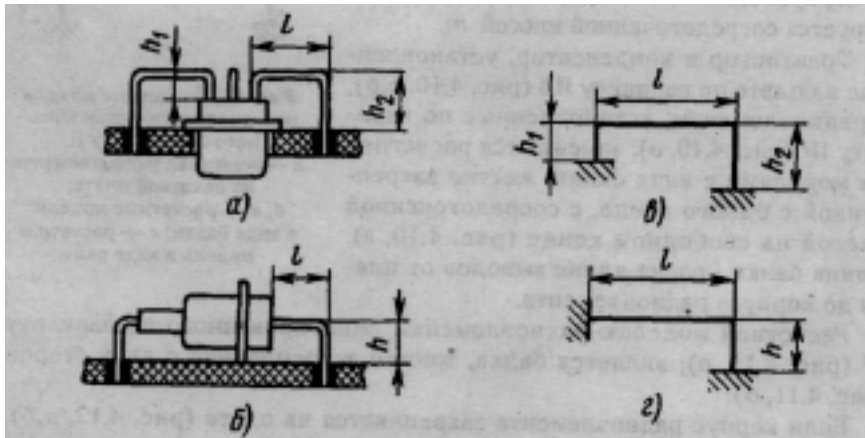


Рис. 4.12. Расчетные модели радиоэлементов, установленных по варианту V: *а, б* — установка радиоэлементов на печатной плате; *в, г* — расчетные модели

рис. 4.13, б показаны возможные формы колебаний, которые характеризуются числом полуволн n , укладывающихся на длине балки.

При расчете частоты свободных колебаний балки принимают следующие допущения:

- упругая ось балки совпадает с линией центров масс поперечных сечений;
- при колебаниях все точки балки смещаются перпендикулярно первоначальному направлению оси;
- все поперечные сечения балки остаются плоскими.

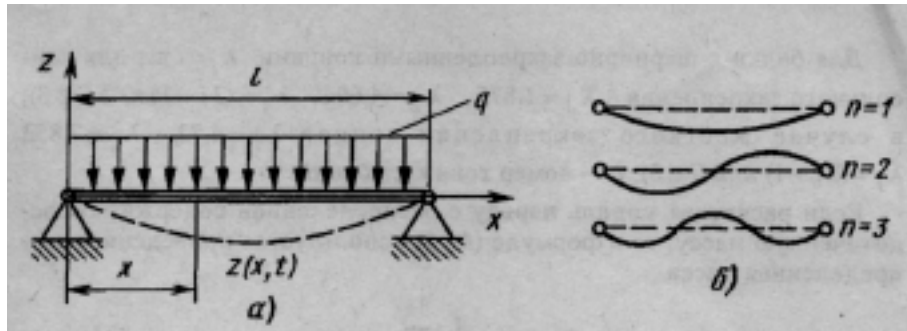


Рис. 4.13. Изгибные колебания балки: *a* — схема нагружения; *б* — формы колебаний

Предполагается также, что в системе действуют силы упругого сопротивления и инерции. Тогда уравнение движения балки может быть представлено в виде

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EJ_y \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right] + m_0 \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = 0 \quad (4.14)$$

где E — модуль упругого материала балки; J_y — момент инерции сечения относительно оси, перпендикулярной плоскости изгиба; m_0 — равномерно распределенная погонная масса балки.

Граничные условия, которые используются при решении уравнения, связывают со способом закрепления балки:

на опертом конце балки прогиб и изгибающий момент равны нулю;

на жестко закрепленном конце прогиб и угол поворота сечения равны нулю;

на свободном конце балки изгибающий момент и перерезывающая сила равны нулю.

Решение (4.14) дает следующее соотношение для частоты свободных колебаний:

$$w_{0i} = \frac{I_i^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{rF}} \quad (4.15)$$

где λ_i параметр, представляющий собой корень частотного уравнения, характеризующий форму колебаний и способ закрепления балки; r — плотность материала; F — площадь поперечного сечения балки. Произведение EJ определяет жесткость балки на изгиб, произведение $rF = m_0$ — равномерно распределенную погонную массу.

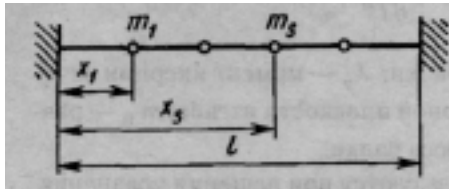
Для балки с шарнирно закрепленными концами $\lambda_i=i\pi$; для консольного закрепления $\lambda_1=1,875$, $\lambda_2=4,694$, $\lambda_i \approx (2i-1)\pi/2$ ($i \geq 3$); в случае жесткого закрепления концов $\lambda_1=4,73$, $\lambda_2=7,853$, $\lambda_i \approx (2i+1)\pi/2$ ($i \geq 3$); i — номер тона колебаний.

Если расчетная модель наряду с распределенной содержит сосредоточенную массу, то в формуле (4.15) используется приведенная распределенная масса

$$m = m_0 + \frac{1}{l} \sum_{s=1}^{s_0} k_s m_s$$

где m_s — сосредоточенная масса; s_0 — число сосредоточенных масс; K_s — коэффициент приведения сосредоточенной массы к равномерно распределенной.

Величина коэффициента K_s зависит от относительной абсциссы сосредоточенной массы $a_s=x_s/l$ (рис. 4.14). Значения коэффициентов



приведения сосредоточенной массы к распределенной для рассмотренных расчетных моделей балки даны в табл. 4.2. Первая строка коэффициентов соответствует первой форме колебаний (основной тон), вторая строка — второй форме.

Рис. 4.14. Схема приведения сосредоточенной массы к распределенной. Формулы расчета моментов инерции сечений балки различной формы приведены в табл. П.1, физические параметры некоторых материалов в табл. П.2 приложения.

Таблица 4.2

Расчетная модель балки	Коэффициент приведения при различных значениях $a_s=x_s/l$								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
	0 0,03	0,02 0,36	0,08 1,11	0,21 1,87	0,46 2,04	0,85 1,39	1,38 1,4	2,1 2,0	2,97 2,1
	0,19 0,69	0,62 1,81	1,31 1,81	1,81 0,69	2,0 0	1,81 0,69	1,31 1,81	0,69 1,81	0,19 0,69
	0,04 0,21	0,037 1,36	1,2 2,27	2,12 1,07	0,52 0	2,12 1,07	1,2 2,27	0,37 1,46	0,04 0,21

Частота свободных колебаний рамы зависит как от параметров модели, так и от направления внешнего воздействия (рис. 4.15), которое определяет вид колебаний, протекающих в отдельных элементах рамы. Если, например, возбуждающая сила направлена вдоль горизонтального звена рамы (рис. 4.15, а), то в вертикальных звеньях возникают изгибные колебания, в горизонтальном — продольные. Внешнее воздействие, приложенное в соответствии с рис. 4.15, в, вызывает изгибные колебания горизонтального звена рамы, изгибные и крутильные — вертикальных звеньев. В связи с тем что жесткости элементов рамы на изгиб, растяжение-сжатие и кручение различны, частота свободных колебаний рамы будет существенно зависеть от направления внешнего воздействия. Силы P_x , P_y и P_z , приложенные к раме, могут рассматриваться как составляющие силы P .

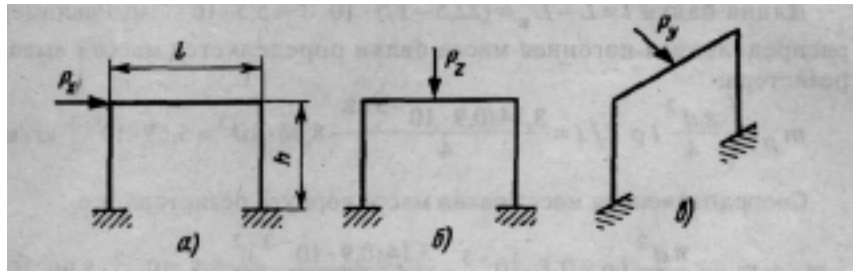


Рис. 4.15. Схема нагружения рамы:
а — составляющая P_x ; б — составляющая P_z ; в — составляющая P_y

Частота свободных колебаний рамы для основного тона определяется по формулам:

для рамы рис. 4.15, а

$$f_{01} = \frac{1}{2p} \left[\frac{48 EJ}{ml^3 [1 - 9/4(k+1)]} \right]^{0.5}$$

для рамы рис. 4.15, б

$$f_{01} = \frac{1}{2p} \left[\frac{24 EJ}{mh^3 [1 + 3/(6k+1)]} \right]^{0.5}$$

для рамы рис. 4.15, в

$$f_{01} = \frac{1}{2p} \left\{ \frac{2}{m} \left[\frac{l^3}{24 EJ} + \frac{h^3}{3 EJ} - \frac{l^4 GJ}{32 EJ (2h EJ + l GJ)} \right] \right\}^{0.5}$$

где m — масса рамы; $\kappa = h/l$ (h, l — геометрические размеры звеньев рамы); $G = E/2(1 + \varepsilon)$ — модуль упругости второго рода (модуль сдвига) материала рамы; ε — коэффициент Пуассона. Расчет частоты свободных колебаний радиоэлементов проиллюстрируем примером.

Пример 4.1. Определить частоту свободных колебаний резистора С2-6-1, установленного на печатной плате по варианту Па. Параметры конструкции резистора (рис. 4.16, а): $D = 6,6$ мм, $L_{\kappa} = 17$ мм, $d = 0,9$ мм, $L = 22,5$ мм, масса резистора m_p — не более 2,5 г. Выводы резистора выполнены из холоднотянутой медной проволоки, модуль упругости $E = 1,23 \cdot 10^{11}$ Н/м², плотность $\rho = 8,96$ г/см³.

Частоту свободных колебаний резистора найдем для двух расчетных моделей: балки и рамы.

Модель резистора в виде балки представлена на рис. 4.16, б.

Длина балки $l = L - L_{\kappa} = (22,5 - 17) \cdot 10^{-3} = 5,5 \cdot 10^{-3}$ м. Равномерно распределенная погонная масса балки определяется массой выводов резистора:

$$m_0 = \left(\frac{\rho d^2}{4} l r \right) / l = \frac{3,14(0,9 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 8,96 \cdot 10^3 = 5,69 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}$$

Сосредоточенная масса равна массе корпуса резистора, т.е.

$$m_0 = m_p - \frac{\rho d^2}{4} l r = 2,5 \cdot 10^{-3} - \frac{3,14(0,9 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 5,5 \cdot 10^{-3} \cdot 8,96 \cdot 10^3 = 2,47 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}$$

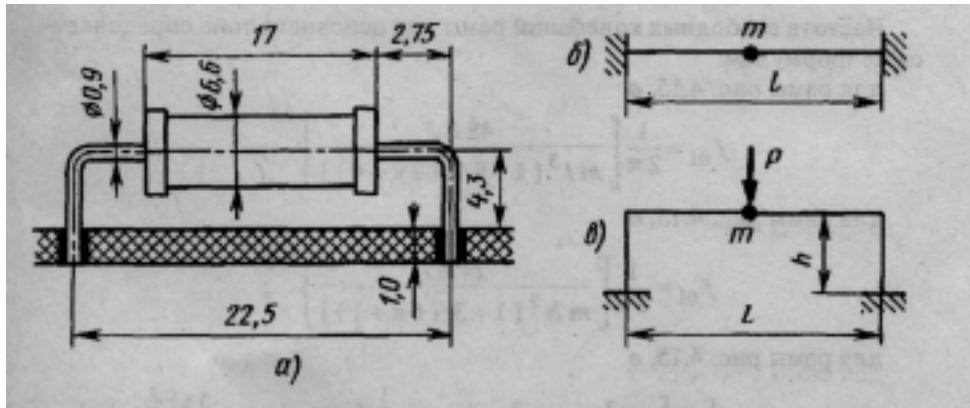


Рис. 4.16. Построение расчетных моделей резистора: а — вариант установки на печатной плате; б — расчетная модель в виде балки; в — модель в виде рамы

Приведенная распределенная погонная масса балки для относительной абсциссы сосредоточенной массы $a_j = 0,5$:

$$m_l = m_0 + (l/l) m_k k_l = 5,69 \cdot 10^{-3} + 2,47 \cdot 10^{-3} \cdot 0,52 / 5,5 \cdot 10^{-3} = 0,239 \text{ кг/м}.$$

$$\text{Момент инерции сечения балки } J = 0,05 d^4 = 3,28 \cdot 10^{-14} \text{ м}^4.$$

Частота свободных колебаний балки основного тона

$$f_{01} = \frac{1}{2p} \frac{I_1^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m_l}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \frac{(4,73)^2}{(5,5 \cdot 10^{-3})^2} \sqrt{\frac{1,23 \cdot 10^{11} \cdot 3,28 \cdot 10^{-14}}{0,239}} = 1,53 \cdot 10^4 \text{ Гц}$$

Расчетная модель резистора в виде рамы приведена на рис. 4.16, в.

Длина горизонтального звена рамы $l = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, высота рамы $h = (0,5D+1)10^{-3} = (0,5 \cdot 6,6+1)10^{-3} = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Отношение высоты рамы к длине $k = h/l = 4,3 \cdot 10^{-3} / 5,5 \cdot 10^{-3} = 0,78$.

Частота свободных колебаний рамы

$$f_{01} = \frac{1}{2p} \left[\frac{24EJ}{mh^3 [1 + 3/(6k+1)]} \right]^{0,5} = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \left\{ \frac{24 \cdot 1,23 \cdot 10^{11} \cdot 3,28 \cdot 10^{-14}}{2,5 \cdot 10^{-3} (4,3 \cdot 10^{-3})^3 [1 + 3/(6 \cdot 0,78 + 1)]} \right\}^{0,5} = 2,839 \cdot 10^3 \text{ Гц}$$

Полученные значения частоты свободных колебаний резистора для моделей балки и рамы существенно расходятся. Однако можно предположить, что модель рамы точнее воспроизводит и конструкцию резистора и динамические процессы при вибрации. Одновременно расхождение результатов расчета подчеркивает важность и ответственность этапа выбора расчетной модели.

4.3.2. Расчет вибропрочности выводов радиоэлементов

Характерным видом отказов радиоэлементов при вибрационных воздействиях является усталостное разрушение выводов.

Усталостные явления в выводах наиболее часто наблюдаются при резонансных колебаниях радиоэлемента или резонансных колебаниях платы, на которой установлен радиоэлемент. Первый случай относится к условиям силового возбуждения механической колебательной системы, второй - к условиям кинематического возбуждения.

Количественной оценкой вибропрочности выводов служит время работы радиоэлемента до разрушения выводов t_p . Для определения t_p , как правило, используется расчетная модель в виде рамы, так как по сравнению с моделью балки она позволяет рассмотреть большее число опасных сечений выводов радиоэлемента.

В случае вибрации на резонансной частоте на радиоэлемент действует инерционная сила P_H . Если направление инерционной силы не совпадает с направлением осей координат, то она может быть разложена на составляющие P_X, P_Y, P_Z .

Расчет времени работы выводов радиоэлемента до усталостного разрушения состоит в определении силы P_H изгибающих моментов и напряжений в опасных сечениях рамы. Для максимального напряжения σ_{max} по кривой усталости материала выводов находят число циклов колебаний до разрушения N к времени работы радиоэлемента до отказа t .

Инерционная сила, действующая на радиоэлемент,

$$P_H = \mu m g n_B,$$

где μ — коэффициент динамичности; m — масса радиоэлемента; n_B — вибрационные перегрузки; g — ускорение силы тяжести.

Коэффициент динамичности на резонансной частоте $\mu = \pi/\Lambda$, где Λ — логарифмический декремент затухания.

Численное значение Λ можно найти через частоту свободных колебаний системы f_{01} или коэффициент затухания δ_0 :

$$\Lambda = \pi/\sqrt{f_{01}}; \quad \Lambda = 2\pi\delta_0.$$

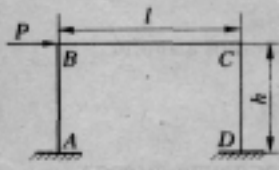
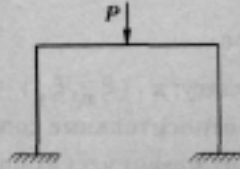
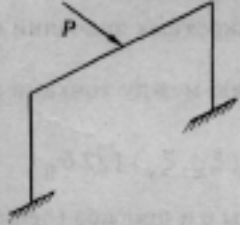
Для реальных систем $\delta_0 = 0,02...0,25$ [23]. Формулы изгибающих моментов в характерных точках рам приведены в табл. 4.3.

Механические напряжения в характерных сечениях определяют с помощью соотношения

$$\sigma = M_u / W_u,$$

где M_u — изгибающий момент в сечении; $W_u = J_x / y_{max}$ — момент сопротивления изгибу; J_x — момент инерции сечения относительно оси, перпендикулярной плоскости изгиба; y_{max} — расстояние от нейтральной линии сечения до поверхности упругого элемента.

Таблица 4.3

Схема рамы и нагрузка	Изгибающие моменты в характерных сечениях
	$M_A = M_D = (1+3\kappa)hP/2(1+6\kappa);$ $M_B = M_C = 1,5\kappa hP/(1+6\kappa);$ $\kappa = h/L.$
	$M_A = M_D = Pl/8(2+\kappa);$ $M_B = M_C = Pl/4(2+\kappa).$
	$M_A = M_D = Ph/2;$ $M_B = M_C = (Pl/4)[1 - l/[4EJ(h/GJ + l/2EJ)]].$

Для максимального напряжения по кривой усталости материала вывода находят число циклов нагружения до разрушения выводов N , затем — время работы радиоэлемента до отказа:

$$t_p = Np/f\omega l$$

Случай колебаний элемента на резонансной частоте платы иллюстрируется рис. 4.17. Плата 2 с длиной стороны a совершает изгибные колебания. На выводы радиоэлемента **1**, установленного на плате, действует изгибающий момент, обусловленный поворотом сечения платы на угол θ , и сила, определяемая прогибом платы на величину $z(x)$. При условии, что радиоэлемент уста-

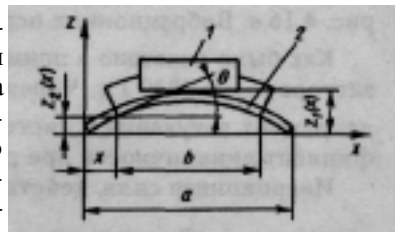


Рис. 4.17. Изгиб выводов радиоэлемента при резонансных колебаниях платы

новлен в центре платы, форму колебаний платы в направлении x можно представить в виде

$$z(x) = Z_0 \sin(\pi x/a),$$

где Z_0 — прогиб в центре платы.

Угол поворота сечения платы в точке крепления вывода

$$q = \frac{\partial z(x)}{\partial(x)} = Z_0 \frac{p}{0} \cos \frac{p \cdot x}{a}$$

где x — расстояние от края платы до точки крепления вывода.

Прогиб в центре платы

$$Z_0 = Z_0 k_1(\zeta_x, \zeta_y) / 2\delta_0$$

где Z_0 — амплитуда вибраций, возбуждающих плату; $k_1(\zeta_x, \zeta_y)$ — коэффициент формы колебаний платы; ζ_x, ζ_y — относительные координаты центра платы; $2\delta_0 = 1/\sqrt{f_{01}}$ — коэффициент механических потерь на резонансной частоте f_{01} основного тона колебаний платы.

Коэффициенты формы колебаний для дискретных значений относительных координат приведены в [24].

Прогиб платы на отрезке, равном расстоянию между точками крепления выводов, может быть определен как

$$Z(x) = Z_2(x) \cdot Z_1(x) = Z_0 [k_1(\zeta_x, \zeta_y) - K_2(\zeta_x, \zeta_y)] / 2\delta_0.$$

Через значения угла поворота сечения платы θ и прогиба (деформации) $Z(x)$ находят изгибающие моменты в характерных точках (см. табл. 4.3). Далее порядок решения задачи не отличается от случая вибраций элемента на частоте свободных колебаний.

Пример 4.2. Определить время работы резистора до разрушения выводов при вибрации на резонансной частоте основного тона. Параметры конструкции резистора соответствуют рис. 4.16, а; расчетная модель — рис. 4.16, в. Вибрационные перегрузки резистора $n_g = 10$.

Как было показано в примере 4.1, частота свободных колебаний резистора $f_{01} = 2839$ Гц. Через значение f_{01} находим логарифмический

декремент затухания в системе $\Lambda = \pi / \sqrt{f_{01}} = 3,14 \sqrt{2839} = 0,059$ и коэф-

фициент динамичности при резонансе $\mu_r = \pi / \Lambda = 3,14 / 0,059 = 53,2$.

Инерционная сила, действующая на резистор,

$$P_{in} = \mu_r m g n_g = 53,2 \cdot 2,510^{-3} \cdot 9,8 \cdot 10 = 13,04 \text{ Н.}$$

По формулам табл. 4.3 определим изгибающие моменты для характерных точек:

$$M_A = M_D = P_{II}/8(2 + \kappa) = 13,03 \cdot 5,5 \cdot 10^{-3} / 8(2 + 0,78) = 3,22 \cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_E = M_C = P_{II}/4(2 + \kappa) = 13,03 \cdot 5,5 \cdot 10^{-3} / 4(2 + 0,78) = 6,44 \cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Момент сопротивления изгибу выводов резистора

$$W_{II} = J/(0,5\eta) = 3,28 \cdot 10^{-14} / (0,5 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3}) = 7,29 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3.$$

Изгибные напряжения в характерных точках:

$$\sigma_D = \sigma_A = M_A/W_{II} = 3,22 \cdot 10^{-3} / 7,29 \cdot 10^{-11} = 4,42 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2,$$

$$\sigma_B = \sigma_C = M_B/W_{II} = 6,44 \cdot 10^{-3} / 7,29 \cdot 10^{-11} = 8,84 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2.$$

Таким образом, максимальные изгибные напряжения $\sigma_{\max} = 8,84 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ возникают в точках изгиба выводов резистора.

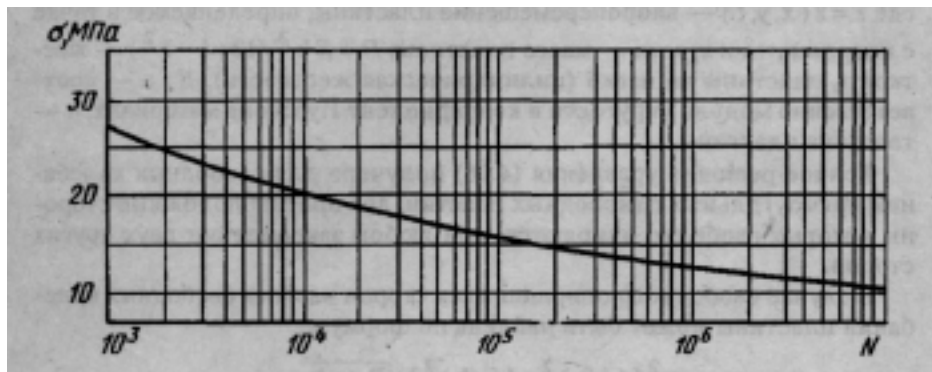


Рис. 4.18. Кривая усталости для медной проволоки

По кривой усталости холоднокатанной меди (рис. 4.18) для $\sigma_{\max} = 8,84 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ находим число циклов нагружения резистора до разрушения выводов $N_P = 10^7$. Время работы резистора до отказа $t_P = N_P/f_{01} = 10^7/2839 = 3,52 \cdot 10^3 \text{ с}$.

4.3.3. Расчет частоты свободных колебаний функциональных узлов

Функциональные узлы РЭС представляют собой планарные конструкции. Поэтому основной расчетной моделью узлов является прямоугольная пластина при определенном закреплении сторон.

Расчет частоты свободных колебаний прямоугольных пластин производится на основе следующих допущений:

изгибные деформации пластины при вибрации по сравнению с ее толщиной малы, упругие деформации подчиняются закону Гука;

пластина имеет постоянную толщину, нейтральный слой пластины не подвержен деформациям растяжения-сжатия;

материал пластины идеально упругий, однородный и изотропный;

все прямые, нормальные к поверхности нейтрального слоя до деформации, остаются прямыми и нормальными к ней после деформации.

Дифференциальное уравнение свободных незатухающих колебаний пластины имеет вид

$$m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + D \left(\frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 z}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 z}{\partial y^4} \right) = 0 \quad (4.16)$$

где $z = z(x, y, t)$ — виброперемещение пластины, определяемое в точке с координатами x, y ; m — масса пластины; $D = Eh^3/12(1-\varepsilon^2)$ — жесткость пластины на изгиб (цилиндрическая жесткость); E, ε — соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала; h — толщина пластины.

Точное решение уравнения (4.16) получено для свободных колебаний прямоугольных однородных пластин, две противоположные стороны которых свободно опираются, при любом закреплении двух других сторон.

В случае свободного опирания всех сторон частота свободных колебаний пластины может быть найдена по формуле

$$\omega_0 = \pi^2 [(i/a)^2 + (j/b)^2] \sqrt{D / \rho h},$$

где i, j — число полуволн синусоиды, укладываемых вдоль сторон пластины; a, b — размеры сторон; ρ — плотность материала пластины. Реальные конструкции функциональных узлов, приводимые к расчетным моделям пластины, по основным параметрам не соответствуют требованиям однородной пластины, а разновидность внутренних структур конструкций РЭС ведет к многообразию краевых условий пластин. Поэтому для расчета частоты свободных колебаний функциональных узлов, как правило, используются соотношения, полученные в резуль-

тате приближенного решения уравнения (4.16) по методу Рэлея или по методу Ритца.

Согласно методу Рэлея частота свободных колебаний ω_0 определяется в результате сопоставления выражений для кинетической и потенциальной энергий колебаний системы. Метод позволяет учесть нагружение платы функционального узла установленными на ней элементами и получить соотношение для расчета частоты свободных колебаний пластины, справедливое при любых краевых условиях. Формула Рэлея, позволяющая найти частоту свободных колебаний основного тона нагруженной пластины, имеет вид

$$w_{01} = \frac{a_1}{a^2} \sqrt{\frac{D}{m_\varepsilon + m_0}} \quad (4.17)$$

где α_1 — коэффициент, характеризующий зависимость частоты свободных колебаний пластины от краевых условий; a — большая сторона пластины; m_ε, m_0 — приведенные к площади пластины массы элементов и самой пластины.

Коэффициент α_1 вычисляется через отношение сторон пластины $\beta = a/b$. Формулы для расчета α_1 приведены в табл. 4.4. На схемах закрепления пунктирной линией обозначено свободное опирание стороны пластины, штриховкой — жесткое закрепление.

Выражение (4.17) обеспечивает удовлетворительную точность лишь при расчете частоты свободных колебаний основного тона. С ростом номера тона точность результатов расчета существенно снижается.

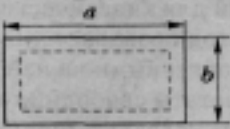
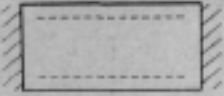
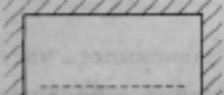
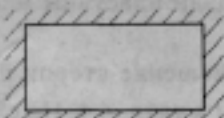
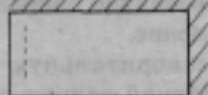
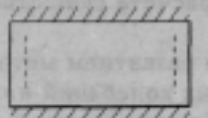
С помощью метода Ритца, являющегося развитием метода Рэлея, получены формулы расчета частот свободных колебаний пластины на основном тоне и обертонах для различных краевых условий. Широкое применение находит формула

$$w_{0i} = \frac{\alpha_i}{a^2} \sqrt{D/mK_\varepsilon} \quad (4.18)$$

где α_i — коэффициент, зависящий от способа закрепления пластины, соотношения ее сторон и номера тона колебаний; m — масса пластины, приведенная к площади; K_ε — коэффициент, учитывающий нагрузку пластины размещенными на ней элементами.

Значение α_i находят в результате решения дифференциального уравнения колебаний прямоугольной пластины при заданных краевых

Таблица 4.4

Схема закрепления	Формулы расчета α_1
	$\alpha_1 = 9,87(1 + \beta^2)$
	$\alpha_1 = 22,37\sqrt{1 + 0,48\beta^2 + 0,19\beta^4}$
	$\alpha_1 = 22,372\sqrt{1 + 0,549\beta^2 + 0,475\beta^4}$
	$\alpha_1 = 22,37\sqrt{1 + 0,61\beta^2 + \beta^4}$
	$\alpha_1 = 15,42\sqrt{1 + 1,19\beta^2 + 2,1\beta^4}$
	$\alpha_1 = 9,87\sqrt{1 + 2,57\beta^2 + 5,14\beta^4}$

условиях. Для определенных комбинаций краевых условий и отношений сторон пластины α_i - табулирован.

Для упрощения процедуры расчета круговой частоты свободных колебаний пластины основного тона формула (4.18) преобразуется:

$$f_{01} = \frac{Ch}{a^2} K_M K_{\mathcal{O}} \cdot 10^5 \text{ Гц} \quad (4.19)$$

где $C = \frac{a_1}{2\rho} \sqrt{D/m_0}$ - частотная постоянная; a — большая сторона пластины, мм; $K_M = \sqrt{Er_c / E_c r}$ - поправочный коэффициент на матери-

ал пластины; E , E_c — модули упругости материала пластины и стали; ρ, ρ_c — их плотности; $K_{\text{э}} = 1 / \sqrt{1 + m_{\text{э}} / m_{\text{п}}}$ -поправочный коэффициент на нагружение пластины равномерно размещенными на ней элементами; $m_{\text{э}}$ — масса элемента; $m_{\text{п}}$ — масса пластины.

Значения частотной постоянной C для некоторых схем закрепления пластины приведены в табл. 4.5.

Построение расчетных моделей функциональных узлов производится на основе анализа реальных конструкций и выявления характерных особенностей, оказывающих существенное влияние на динамические процессы при вибрации. Ниже приводятся примеры моделирования некоторых конструкций функциональных узлов. Узел, выполненный на печатной плате, закрепляемой в четырех точках по углам (рис. 4.19,а), представляют расчетной моделью пластины, равномерно нагруженной радиоэлементами, со свободным опиранием всех сторон (рис. 4.19,б). Принятый способ закрепления обосновывается тем, что при изгибных колебаниях основного тона на каждой стороне пластины укладывается полуволна, узлы перемещения совпадают с точками крепления платы. Поэтому наличие точек закрепления не сказывается на параметрах колебаний.

Расчетной моделью узла на печатной плате с размерами сторон a и b , закрепленной в шести точках по контуру (рис. 4.20, а), служит прямоугольная пластина с размерами сторон $a/2$, b , свободно опирающаяся по контуру, с равномерно распределенной нагрузкой (рис. 4,20, б). Основной тон свободных колебаний определяется полуволной, укладываемой вдоль сторон $a/2$ и b пластины.

Конструкция функциональной ячейки блока разъемного типа (рис. 4.21, а) может быть представлена расчетной моделью в виде нагруженной прямоугольной пластины с жестким закреплением двух сторон, на которых установлены контрольная колодка 3 и электрический соединитель 2, и свободным опиранием двух других сторон (рис. 4.21, б). Принятая схема закрепления обосновывается тем, что электрический соединитель и контрольная колодка по сравнению с печатной платой имеют значительно большую жесткость на изгиб, а расстояние между стенками направляющих, с помощью которых плата устанавливается в блоке, в большинстве случаев существенно превышает толщину печатной платы.

Каркасные конструкции функциональных ячеек (печатная плата закреплена на рамке по контуру) обычно моделируют пластиной с жестким закреплением всех сторон. Другой подход к построению расчетных моделей таких конструкций изложен в следующем разделе.

Таблица 4.5

Схема закрепления пластины	Значения частотной постоянной C								
	$a/b=0,1$	$a/b =$	$a/b=0,5$	$a/b=1$	$a/b=1,5$	$a/b=2$	$a/b=2,5$	$a/b=3$	$a/b=4$
	23,1	23,8	28,6	45,8	74,4	114,5	166,0	228,9	389,3
	52,0	52,4	55,3	67,3	90,9	127,6	176,9	238,8	396,7
	52,1	52,5	56,2	74,1	102,5	170,6	248,5	345,1	592,8
	52,1	52,6	57,2	83,8	141,4	228,6	343,7	485,4	847,6
	23,2	23,9	32,1	67,6	131,1	221,4	337,9	480,5	843,6
	35,9	36,7	42,2	74,1	135,4	224,6	340,6	482,8	845,8

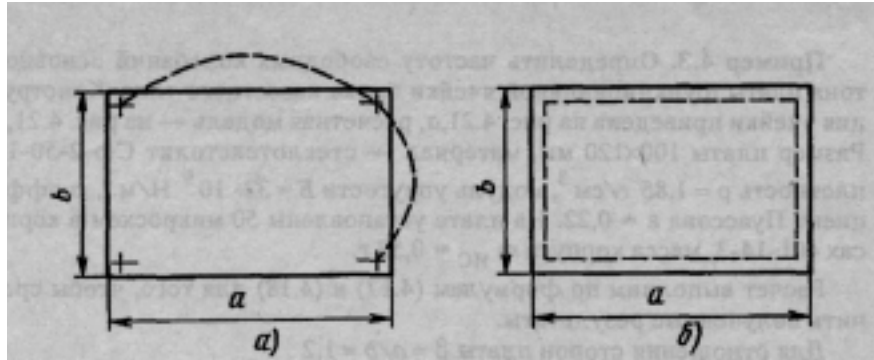


Рис. 4.19. Построение расчетной модели платы, закрепленной в четырех точках по углам:
 а — конструкция платы; б — расчетная модель

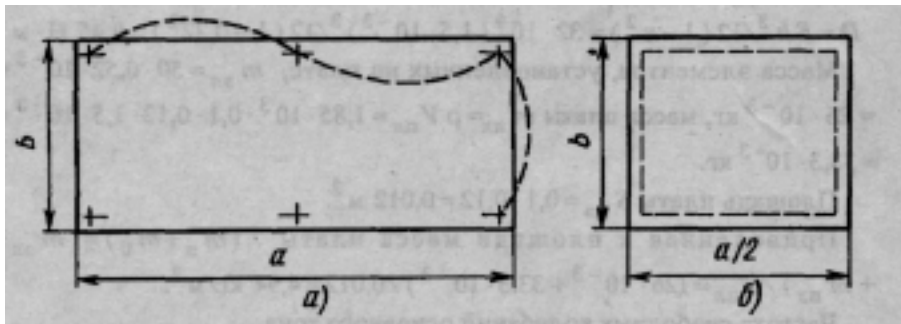


Рис. 4.20. Построение расчетной модели платы, закрепленной в шести точках по контуру:
 а — конструкция платы; б — расчетная модель

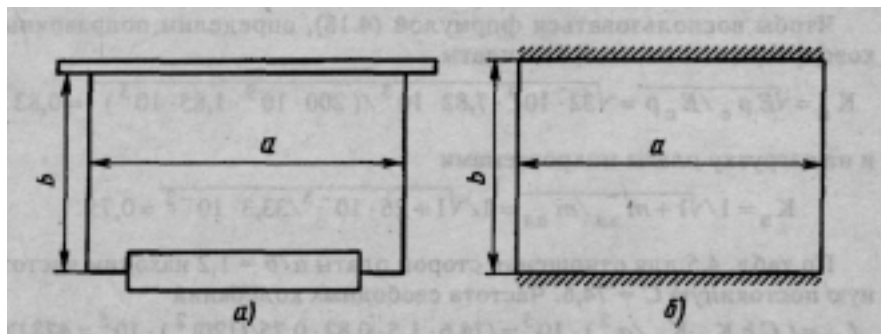


Рис. 4.21. Построение расчетной модели функциональной ячейки блока разъемного типа:
 а — конструкция платы; б — расчетная модель

Пример 4.3. Определить частоту свободных колебаний основного тона платы функциональной ячейки блока кассетного типа. Конструкция ячейки приведена на рис. 4.21,а, расчетная модель — на рис. 4.21, б. Размер платы 100x120 мм, материал — стеклотекстолит СФ-2-50-1,5, плотность $\rho = 1,85 \text{ г/см}^3$, модуль упругости $E = 32 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$, коэффициент Пуассона $\epsilon = 0,22$. На плате установлены 50 микросхем в корпусах 401-14-3, масса корпуса $m_{ис} = 0,52 \text{ г}$.

Расчет выполним по формулам (4.17) и (4.18) для того, чтобы сравнить полученные результаты.

Для отношения сторон платы $\beta = a/b = 1,2$

$$a_1 = 22,37 \sqrt{1 + 0,48b^2 + 0,19b^4} = 22,37 \sqrt{1 + 0,691 + 0,393} = 32,3 \text{ а,}$$

Цилиндрическая жесткость платы

$$D = Eh^3/12(1-\epsilon^2) = 32 \cdot 10^9 (1,5 \cdot 10^{-3})^3 / 12 (1 - 0,22^2) = 9,45 \text{ Н-м.}$$

Масса элементов, установленных на плате, $m_{эл} = 50 \cdot 0,52 \cdot 10^{-3} =$

$$= 26 \cdot 10^{-3} \text{ кг, масса платы } m_{пл} = \rho V_{пл} = 1,85 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 0,12 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} =$$

$$= 33,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг.}$$

Площадь платы $S_{пл} = 0,1 \cdot 0,12 = 0,012 \text{ м}^2$.

Приведенная к площади масса платы $(m_{э} + m_0) = (m_{эл} + m_{пл})/S_{пл} = (26 \cdot 10^{-3} + 33,3 \cdot 10^{-3})/0,012 = 4,94 \text{ кг/м}^2$.

Частота свободных колебаний основного тона

$$f_{01} = \frac{a_1}{2\pi a^2} \sqrt{D/(m_{э} + m_0)} = \frac{32,3}{6,28 \cdot 1,44 \cdot 10^{-2}} \sqrt{9,45/4,94} = 494 \text{ Гц}$$

Чтобы воспользоваться формулой (4.18), определим поправочные коэффициенты на материал платы

$$K_M = \sqrt{Er_C / E_C r} = \sqrt{32 \cdot 10^9 \cdot 7,82 \cdot 10^3 / (200 \cdot 10^9 \cdot 1,85 \cdot 10^3)} = 0,82$$

и на нагрузку платы микросхемами

$$K_{э} = 1/\sqrt{1 + m_{эл}/m_{пл}} = 1/\sqrt{1 + 26 \cdot 10^{-3} / 33,3 \cdot 10^{-3}} = 0,75$$

По табл. 4.5 для отношения сторон платы $a/b = 1,2$ находим частотную постоянную $C = 74,6$. Частота свободных колебаний

$$f_{01} = (C h K_M K_{э} / a^2) \cdot 10^5 = (74,6 \cdot 1,5 \cdot 0,82 \cdot 0,75 / (120)^2) \cdot 10^5 = 478 \text{ Гц.}$$

Таким образом, расхождение результатов расчета частоты свободных колебаний основного тона пластины по формулам (4.17) и (4.18) лежит в пределах 3,5%.

4.3.4. Расчет частоты свободных колебаний функциональных узлов сложных конструкций

Понятие «сложные конструкции» охватывает функциональные узлы, усиленные ребрами жесткости, рамками, обечайками и другими элементами, повышающими жесткость конструкции.

Частота свободных колебаний основного тона таких конструкций может быть найдена по формуле Рэлея (4.17). Применение формулы (4.17) предполагает переход от сложной конструкции узла к модели эквивалентной прямоугольной пластины с параметрами a , D и $m_0=(m_{эл}+m_{пл})/S_{пл}$. Жесткость эквивалентной пластины на изгиб находят как $D = D_{пл} + D_p$, где $D_{пл}$, D_p — цилиндрическая жесткость платы и рамки на изгиб соответственно.

Расчет цилиндрической жесткости платы производят по формуле

$$D_{пл} = \frac{EJ}{b(1-\epsilon^2)} \quad (4.2)$$

где E — модуль упругости материала платы; J — момент инерции сечения платы в плоскости изгиба; b — ширина сечения; ϵ — коэффициент Пуассона для материала платы.

Значение D можно найти также с помощью (4.20), если подставить в формулу момент инерции сечения рамки.

Ввиду того что сечение рамки или других элементов, повышающих жесткость конструкции узла, имеет сложную конфигурацию, момент инерции сечения определяют как сумму осевых и центробежных моментов элементарных сечений правильной геометрической формы, на которые разбивается исходное сечение:

$$J_p = \sum_{i=1}^n J_i + \sum_{i=1}^n l_i^2 F_i \quad (4.21)$$

где J_i , $l_i^2 F_i$ — осевой и центробежный моменты i -го элементарного сечения соответственно; F_i — площадь этого сечения; l_i — расстояние в плоскости изгиба сечения между центрами тяжести ЦТ i -го элементарного сечения и сечения рамки.

Подход к определению момента инерции сечения рамки иллюстрируется с помощью рис. 4.22.

Соотношения для расчета осевых моментов инерции сечений простейших геометрических форм и координат центра тяжести приведены в приложении (табл. П.1).

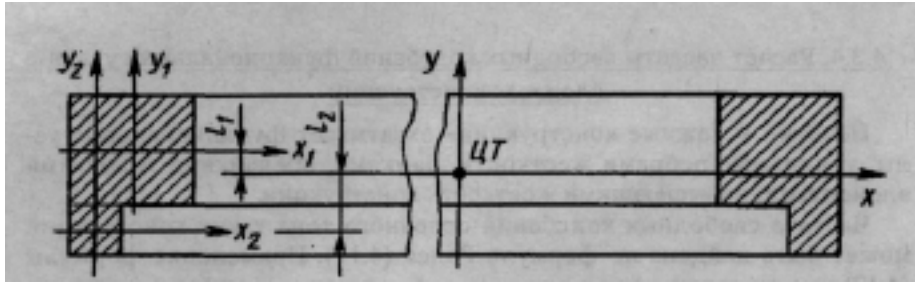


Рис. 4.22. К расчету момента инерции сечения рамки

При выборе сечения рамки необходимо исходить из принципа наилучшего случая: жесткость конструкции на изгиб в сечении должна быть минимальной, что позволит найти самую низкую частоту свободных колебаний конструкции узла.

Коэффициент α_j , входящий в формулу (4.18), при конкретном закреплении сторон определяют по таблицам, приведенным в [64]. В случае закрепления пластины в четырех или шести точках по периметру, значение α_j может быть найдено по формуле:

$$\alpha_j = \pi^2(1 + a^2/b^2),$$

где a, b — длина и ширина пластины.

4.4. Расчет ударпрочности конструкций РЭС

Конструкция РЭС отвечает требованиям ударпрочности, если перемещение и ускорение при ударе не превышают допустимых значений, а элементы конструкции обладают запасом прочности на изгиб. В связи с тем что изгибные напряжения в элементах конструкции в конечном счете определяются величиной перемещений (прогибов), расчет ударпрочности конструкций может быть сведен к нахождению запаса прочности элементов при прогибе.

Исходными данными для расчета являются: масса m и геометрические размеры элемента конструкции; характеристики материала (модуль упругости E , Па; плотность ρ , кг/м³; коэффициент Пуассона ν); перегрузки при ударе $n_{уд}$ и длительность удара i , с). Основу методики расчета составляют соотношения, приведенные в разд. 4.22.

Прежде всего, по заданным параметрам удара необходимо определить амплитуду ускорения при ударе $a_{max} = n_{уд} g$, значение скорости в

начальный момент удара $v_0 = \alpha_{\max} t$ или эквивалентную высоту падения массы $H_0 = v_0^2 / 2g$.

Далее находят частоту свободных колебаний конструкции f_0 , по значению которой вычисляется максимальный прогиб упругого элемента при ударе. В зависимости от модели, к которой приводится реальная конструкция, расчет частоты свободных колебаний производится по формулам (4.15), (4.17)—(4.19).

Составляющим максимального прогиба упругого элемента конструкции при ударе является статический прогиб $z_{CT} = mg/k$. Неизвестное значение жесткости конструкции k в выражении для z_{CT} можно найти, если соотношения (4.15), (4.17)—(4.19) преобразовать к виду

$$f_{01} = \frac{1}{2p} \sqrt{k/m}. \text{ Так, например, воспользовавшись формулой (4.15) для}$$

основного тона колебаний, получим $k = EJ\lambda^2 l / l^3$. Из формулы Рэлея (4.17) найдем $k = Da^3 b / a^3$ т.д. Другой подход к определению жесткости конструкции состоит в использовании значения частоты свободных колебаний. Из основной формулы для расчета частоты свободных колебаний следует, что $k = (2\pi f_{01})^2 m$.

Знание статического прогиба z_{CT} , скорости V_0 в начальный момент удара и частоты свободных колебаний f_{01} позволяет найти максимальный прогиб упругого элемента (максимальное перемещение массы)

$$z_{\max} = \sqrt{z_{CT}^2 + (v_0 / 2\pi f_{01})^2}$$

и полную динамическую деформацию упругого элемента

$$z_D = z_{CT} + z_{\max} = z_{CT} \left(1 + \sqrt{1 + (v_0 / 2\pi f_{01} z_{CT})^2} \right).$$

Полная динамическая деформация определяет эквивалентную силу удара, приложенную к упругому элементу в точке удара: $P_{вд} = kz_D$.

Допустимое напряжение в элементах конструкции при изгибе $\sigma = \sigma / n$, где σ — предельное напряжение в материале; $n = n_1 n_2 n_3$ — коэффициент, характеризующий запас прочности: $n_1 = 1,25 \dots 1,5$ — коэффициент достоверности определения расчетных нагрузок и напряжений; $n_2 = 1,0 \dots 1,5$ — коэффициент, характеризующий степень ответственности детали; $n_3 = 1,2 \dots 3$ — коэффициент, учитывающий однородность механических свойств материалов.

Изгибное напряжение, возникающее в элементах конструкции при ударе, можно найти через изгибающий момент $M_{из}$ и момент сопротивления изгибу $W_{из}$ по формуле $\sigma_{из} = M_{из} / W_{из}$. При расчете изгибающего момента исходят из того, что сила $P_{уд}$ приложена в геометрическом центре упругого элемента. Тогда реакция опор упругого элемента составит $P = P_{уд} / 2$, а изгибающий момент $M_{из} = P_P a / 2$, где a — геометрический размер элемента конструкции в плоскости изгиба.

Момент сопротивления упругого элемента изгибу $W_{из} = J / y_{max}$, где J — момент инерции сечения элемента относительно оси изгиба; $y_{max} = h / 2$ — значение координаты от нейтральной оси сечения до поверхности упругого элемента; h — толщина упругого элемента.

Пример 4.4. Прямоугольное основание из сплава Д16Т, покрытое диэлектрическим слоем Al_2O_3 (поликор) и закрепленное в четырех точках по углам, подвергается удару длительностью $\tau = 5 \cdot 10^{-3}$ с при максимальной перегрузке $n_{уд} = 150$ единиц. Проверить условия ударопрочности конструкции, если размеры основания $L_x = L_y = 0,2$ м, толщина пластины $h_1 = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м, толщина диэлектрического покрытия

$h_2 = 0,25 \cdot 10^{-3}$ м.

При решении задачи примем следующие допущения: жесткость конструкции определяется жесткостью металлического основания; расчетной моделью конструкции является прямоугольная пластина со свободным опиранием всех сторон (см. рис. 4.19, б), нагруженная равномерно распределенной массой диэлектрического слоя; прогиб диэлектрического слоя при ударе равен прогибу основания. Решение задачи состоит в определении напряжений, возникающих в основании и диэлектрическом слое при прогибе под действием удара.

Амплитуда ускорения при ударе

$$a_{max} = n_{уд} g = 150 \cdot 9,8 = 1470 \text{ м/с}^2$$

Начальная скорость в момент удара

$$v_0 = a_{max} \tau = 1470 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 7,35 \text{ м/с.}$$

Для расчета частоты свободных колебаний пластины воспользуемся формулой (4.19). При свободном опирании пластины по контуру и от- ' ношении сторон $a/b = 1$ частотная постоянная $C = 45,8$. Масса пластины $m_{из} = 2,76 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 \cdot 0,2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,166$ кг; масса диэлектрического

слоя $m_3 = 3,98 \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot 0,2 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} = 0,0398$ кг. Поправочные коэффициенты на материал пластины $K_m = 1$, на нагружение пластины $K_s = 0,9$. Частота свободных колебаний основания

$$f_{01} = (45,8 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 0,9 / (200)^2) \cdot 10^5 = 154,6 \text{ Гц.}$$

Жесткость пластины

$$k = (2\pi f_{01})^2 m_{\Pi} = (6,28 \cdot 154,6)^2 \cdot 0,166 = 1,56 \cdot 10^5 \text{ Н/м.}$$

Статический прогиб пластины

$$z_{\text{ст}} = 0,166 \cdot 9,81 / 1,56 \cdot 10^5 = 1,04 \cdot 10^{-5}.$$

Максимальный прогиб упругого элемента

$$z_{\text{max}} = \sqrt{(1,04 \cdot 10^{-5})^2 + (7,35 / 6,28 \cdot 154,6)^2} = 7,57 \cdot 10^{-3} \text{ Н / м}$$

Полная динамическая деформация

$$z_{\text{д}} = 1,04 \cdot 10^{-5} + 7,57 \cdot 10^{-3} = 7,58 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Эквивалентная сила удара

$$P_{\text{уд}} = 1,56 \cdot 10^5 \cdot 7,58 \cdot 10^{-3} = 1183,2 \text{ Н.}$$

Принимаем минимальное значение коэффициента запаса

$$n = 1,25 \cdot 1,0 \cdot 1,2 = 1,5,$$

тогда допустимое напряжение в материале основания

$$\sigma_{\text{доп1}} = 520 \cdot 10^6 / 1,5 = 346,7 \cdot 10^6 \text{ Па,}$$

в материале диэлектрического слоя

$$\sigma_{\text{доп2}} = 200 \cdot 10^6 / 1,5 = 133,3 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Изгибающий момент, действующий на основание и диэлектрический слой

$$M_{\text{и}} = 1183,2 \cdot 0,2 / 4 = 59,16 \text{ Н·м,}$$

момент инерции сечения основания

$$J_1 = L_y \cdot h_1^3 / 12 = 0,2 (1,5 \cdot 10^{-3})^3 / 12 = 5,63 \cdot 10^{-11} \text{ м}^4,$$

момент инерции сечения диэлектрического слоя

$$J_2 = L_y \cdot h_2^3 / 12 = 0,2 (0,25 \cdot 10^{-3})^3 / 12 = 2,6 \cdot 10^{-13} \text{ м}^4,$$

Момент сопротивления изгибу основания

$$W_{\text{и1}} = J_1 / (0,5 h_1) = 5,63 \cdot 10^{-11} / (0,5 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}) = 7,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3,$$

диэлектрического слоя

$$W_{\text{и2}} = 2,6 \cdot 10^{-13} / (0,5 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}) = 20,8 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3.$$

Напряжение в материале основания

$$\sigma_{\text{и1}} = M_{\text{и}} / W_{\text{и1}} = 59,16 / 7,5 \cdot 10^{-8} = 7,89 \cdot 10^8 \text{ Па,}$$

в материале диэлектрического слоя

$$\sigma_{н2} = M_{н}/W_{н2} = 59.16/20.8 \cdot 10^{-10} = 2,84 \cdot 10^{10} \text{ Па.}$$

Полученные значения напряжений в материале основания и диэлектрического покрытия превышают допустимые величины. Следовательно, необходимые меры по повышению ударпрочности конструкции — увеличение толщины основания и выполнение диэлектрического покрытия не в виде сплошного слоя, а в виде фрагментов с определенными размерами сторон.

4.5. Основы расчета виброизоляции конструкций РЭС

Одной из наиболее эффективных мер борьбы с вибрациями является виброзащита РЭС с помощью различных систем виброизоляции: между защищаемым объектом и вибрирующей поверхностью помещаются устройства-виброизоляторы, которые ослабляют вибрационные воздействия на объект.

Основным элементом виброзащитной системы служит амортизатор (виброизолятор). Амортизатор представляет собой конструкцию, объединяющую упругий и демпфирующий элементы. Упругие силы в амортизаторе создаются стальными пружинами, упругой составляющей жесткости резиновых или полимерных элементов, упругостью металлорезины или троса. Силы сопротивления (демпфирование) в конструкции амортизатора образуются в результате сухого трения в материале упругого и демпфирующего элементов и вязкого трения.

В зависимости от типа упругого элемента и способа демпфирования амортизаторы можно разделить на следующие классификационные группы: резинометаллические, пружинные с воздушным демпфированием, пружинные с фрикционным демпфированием, цельнометаллические со структурным демпфированием. Конструкции некоторых типов амортизаторов, являющихся представителями названных классификационных групп, приведены на рис. 4.23.

Виброизолирующие свойства амортизаторов определяются их параметрами. К основным параметрам амортизаторов относятся:

- номинальная нагрузка амортизатора P_n , при которой статическая деформация упругого элемента находится в пределах рекомендуемых значений;
- частота свободных колебаний при номинальной нагрузке вдоль основной оси;
- статический прогиб при номинальной нагрузке $z_{ст}$;
- жесткость амортизаторов k ;

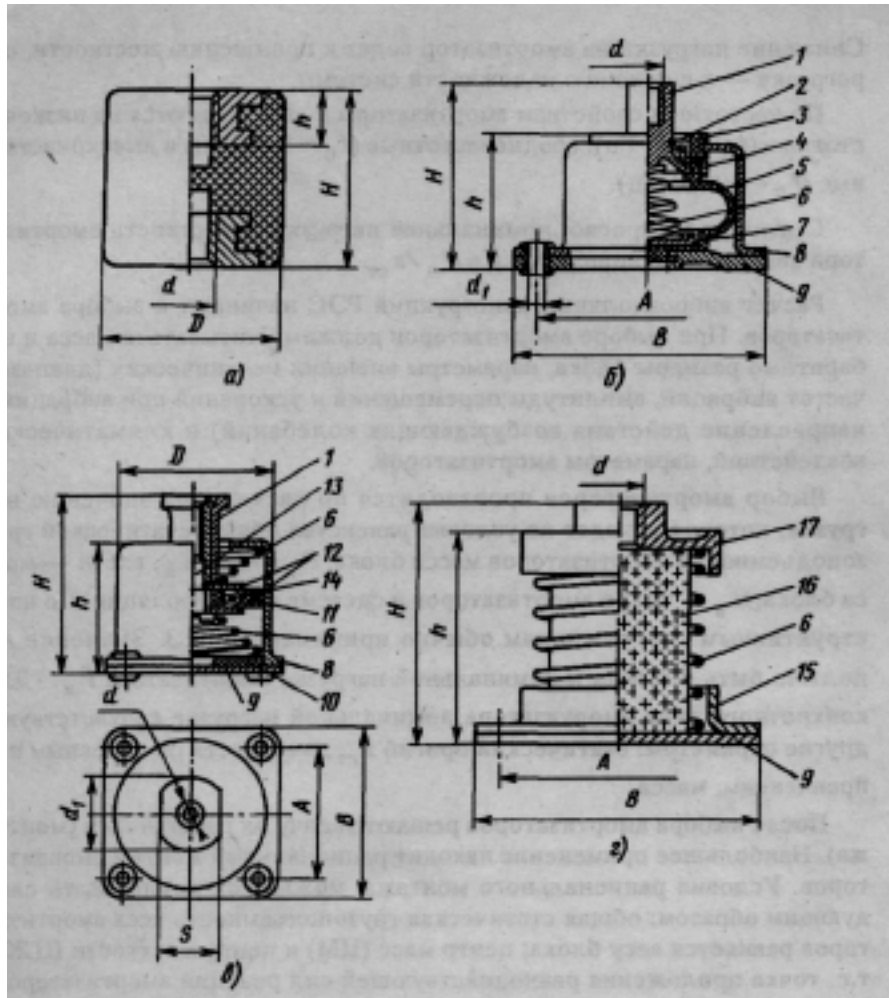


Рис. 4.23. Конструкция амортизаторов: а — «ножка» (АН); б — с воздушным демпфированием (АД); в — пространственного нагружения (АПН); г — пружинно-сетчатый амортизатор; 1 — бобышка; 2 — стопорное кольцо; 3 — резиновое кольцо; 4 — крышка; 5 — баллон; 6 — пружина; 7 — прокладка; 8 — корпус; 9 — основание; 10 — ограничитель; 11 — фрикционные сухари; 12 — шайбы; 13 — винт; 14 — распорное кольцо; 15 — направляющая; 16 — сетчатая подушка; 17 — крышка

параметры, характеризующие работоспособность амортизаторов в условиях климатических воздействий.

При выборе амортизаторов для системы виброизоляции исходят из того, что амортизаторы должны работать при номинальной нагрузке.

Снижение нагрузки на амортизатор ведет к повышению жесткости, перегрузка — к снижению надежности системы.

По частотным свойствам амортизаторы подразделяются на низкочастотные ($f_0 = 3...4$ Гц), среднечастотные ($f_0 = 8...10$ Гц) и высокочастотные ($f_0 = 20...25$ Гц).

Статический прогиб, номинальная нагрузка и жесткость амортизатора связаны соотношением $k = P_n / z_{ст}$.

Расчет виброизоляции конструкций РЭС начинают с выбора амортизаторов. При выборе амортизаторов должны учитываться масса и габаритные размеры блока, параметры внешних механических (диапазон частот вибраций, амплитуды перемещений и ускорений при вибрациях, направление действия возбуждающих колебаний) и климатических воздействий, параметры амортизаторов.

Выбор амортизаторов производится по расчетному значению нагрузки, которое находят из условия равенства общей статической грузоподъемности амортизаторов массе блока: $P_a = m g / n_a$, где m — масса блока; n_a — число амортизаторов в системе виброизоляции. По конструктивным соображениям обычно принимают $n_a \geq 3$. Значение P_a должно быть близким к номинальной нагрузке амортизатора P_n . Для конкретного типа амортизатора номинальной нагрузке соответствуют другие параметры: статический прогиб $z_{ст}$, жесткость по основным направлениям, масса.

После выбора амортизаторов решают задачу их расстановки (монтажа). Наибольшее применение находит рациональный монтаж амортизаторов. Условия рационального монтажа, можно сформулировать следующим образом: общая статическая грузоподъемность всех амортизаторов равняется весу блока; центр масс (ЦМ) и центр жесткости (ЦЖ), т.е. точка приложения равнодействующей сил реакций амортизаторов, совпадают или лежат на одной вертикали.

Это обусловлено тем, что если на изолируемую систему действуют периодические возбуждающие силы с широким спектром частот, то для обеспечения высокой эффективности виброизоляции все шесть частот свободных колебаний системы должны лежать в узком диапазоне частот. Совмещение частот свободных колебаний может быть достигнуто соответствующим выбором жесткости амортизаторов и координат их расстановки.

Широкое распространение получило расположение амортизаторов, при котором ЦЖ находится ниже ЦМ (рис. 4.24, а). Основным достоин-

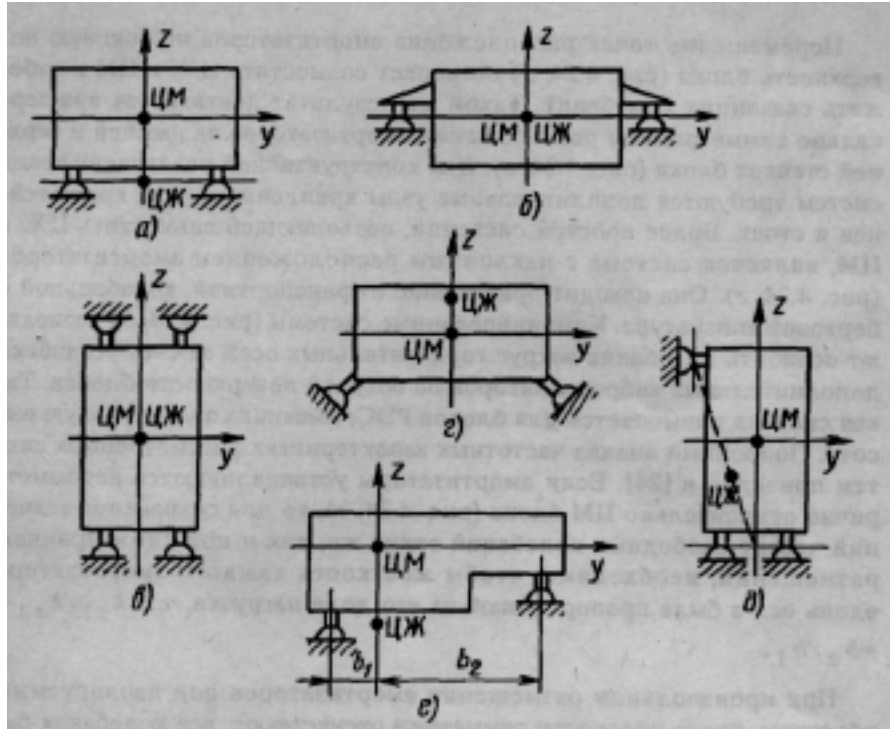


Рис. 4.24. Варианты монтажа амортизаторов:
a, б, в, з, е — схемы рационального монтажа;
д — комбинированная схема

ством такой системы является то, что она дает возможность разместить блоки аппаратуры в непосредственной близости друг от друга. Если все амортизаторы имеют одинаковую жесткость k_z , то смещение блока вдоль оси z будет происходить без перекосов, т.е. исключаются повороты относительно осей x ; и y . Частота свободных колебаний вдоль оси z для этого случая определяется соотношением

$$w_{0z} = \sqrt{n_a k_z / m}$$

где n_a — число амортизаторов; m — масса виброизолируемого объекта.

При использовании в системе (см. рис. 4.24, а) ассиметричных амортизаторов ($k_x = k_y$) образуются две плоскости симметрии xOz и yOz и возникают дополнительно пять связанных (сложных) колебаний блока.

Перемещение точек расположения амортизаторов на боковую поверхность блока (рис. 4.24, б) позволяет совместить ЦЖ и ЦМ и избежать связанных колебаний. Такой же результат достигается при зеркально симметричном расположении амортизаторов на нижней и верхней стенках блока (рис. 4.24, в). Для конструктивной реализации таких систем требуются дополнительные узлы крепления в виде кронштейнов и стоек. Более простой системой, позволяющей совместить ЦЖ с ЦМ, является система с наклонным расположением амортизаторов (рис. 4.24, г). Она находит применение в транспортной, корабельной и бортовой аппаратуре. Комбинированные системы (рис. 4.24, д) позволяют ослабить колебания вокруг горизонтальных осей за счет установки дополнительных виброизоляторов на боковой поверхности блоков. Такая система применяется для блоков РЭС, имеющих значительную высоту. Подробный анализ частотных характеристик рассмотренных систем приведен в [24]. Если амортизаторы устанавливаются несимметрично относительно ЦМ блока (рис. 4.24, е), то для сохранения значений частот свободных колебаний таких же, как и при симметричном размещении, необходимо, чтобы жесткость каждого амортизатора вдоль оси z была пропорциональна его доле нагрузки, т.е. $k_{z1}/k_{z2} = b_2/b_1$

При произвольном размещении амортизаторов под изолируемым объектом, когда плоскости симметрии отсутствуют, все колебания будут связаны между собой. Наличие хотя бы одной плоскости симметрии вызывает распад связанных колебаний на две не связанные между собой группы, одна из которых характеризует движение центра масс в плоскости симметрии, другая — в перпендикулярном этой плоскости направлении.

Координаты центра жесткости амортизаторов можно вычислить через статические моменты жесткости относительно координатных плоскостей:

$$x_k = \frac{\sum k_{x_i} x_i}{\sum k_{x_i}} \quad y_k = \frac{\sum k_{y_i} y_i}{\sum k_{y_i}} \quad z_k = \frac{\sum k_{z_i} z_i}{\sum k_{z_i}}$$

где x_i, y_i, z_i — координаты расположения амортизаторов; $k_{x_i}, k_{y_i}, k_{z_i}$ — жесткости амортизаторов по направлениям осей координат.

Аналитически условия рациональной расстановки амортизаторов представляют в виде

$$\left. \begin{aligned} \Sigma P_i &= mg; \\ \Sigma P_i x_i &= 0, \Sigma P_i y_i = 0, \Sigma P_i z_i = 0; \\ \Sigma P_i x_i y_i &= 0; \Sigma P_i x_i z_i = 0; \Sigma P_i y_i z_i = 0, \end{aligned} \right\} \quad (4.22)$$

где P_i — реакция i -го амортизатора.

Первое уравнение системы (4.22) показывает, что общая грузоподъемность всех амортизаторов равна весу амортизируемого объекта, три следующие уравнения представляют условия равновесия пространственной системы параллельных сил, три последние уравнения — условия равенства нулю центробежных моментов реакций амортизаторов относительно главных центральных осей инерции блока. Другими словами, равенство нулю моментов и центробежных моментов реакций амортизаторов означает совпадение ЦМ объекта с ЦЖ системы виброизоляции.

Решение уравнений (4.22) представляет собой содержание задачи статического расчета системы виброизоляции. При использовании в системе n_a амортизаторов число неизвестных в уравнениях (4.22) составляет $4n_a$. Поэтому в исходном виде система виброизоляции является статически неопределимой. Чтобы произвести расчет такой системы, необходимо задать $(4n_a - 7)$ величин. Например, при $n_a = 3$ требуется взять пять величин, при $n_a = 4$ — девять и т.д. Обычно дополнительные условия задают в виде координат расположения определенного числа амортизаторов, симметричного расположения амортизаторов относительно центра масс и др.

В результате решения уравнений (4.22) получают значения координат всех амортизаторов и их реакций P_i . Зная реакции амортизаторов, можно определить статические прогибы $z_i = P_i / k_z$. Если статические прогибы амортизаторов различны, то производится выравнивание объекта с помощью компенсирующих прокладок. Толщину прокладок находят как разность статических прогибов.

Расчет виброизоляции конструкций РЭС завершается определением динамических характеристик системы и эффективности амортизации (динамический расчет). Для выбранного типа амортизаторов и, следовательно, известных значений жесткости находят частоту свободных колебаний объекта $w_0 = \sqrt{n_a k / m}$ и частотную расстройку

$v = \omega_n / \omega_0$, где ω_n — нижнее значение частоты диапазона частот внешних вибрационных воздействий. Проверяется условие $v > 5 \dots 6$. Далее (см. разд. 4.2.1) определяют коэффициент передачи вибраций η и эффективность виброизоляции $\Xi = (1 - \eta) \cdot 100\%$. Если значение

эффективности ниже требуемой величины, то пересматривается структура системы виброизоляции.

Пример 4.5. Выбрать амортизаторы для виброизоляции блока массой 25 кг и габаритными размерами 46x60x50 см, если диапазон частот вибрационных воздействий 30...400 Гц, виброускорение $a_g < 10g$, диапазон температур $t = -60...+80^\circ\text{C}$, относительная влажность 98% при $t = 40^\circ\text{C}$. Определить эффективность амортизации.

Исходя из конструктивных соображений принимаем плоскую схему расстановки с четырьмя амортизаторами, причем плоскость с амортизаторами проходит через ЦМ блока ($z_i = 0$). Нагрузка, приходящаяся на амортизатор, $P_a = m/g/n_a = 25 \cdot 9,8/4 = 61,25 \text{ Н}$.

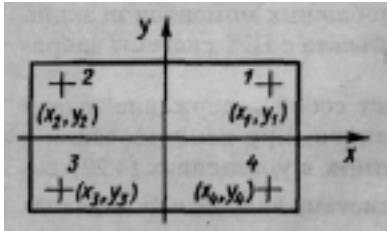


Рис. 4.25. Схема расстановки

По условиям эксплуатации и нагрузке ($P_a \approx P_n$) выбираем амортизаторы типа АПН-4 ($P_n = 39,2... 68,7 \text{ Н}$, $k_z = 32,3 \text{ Н/мм}$). В связи с тем что $z_i = 0$, число уравнений в системе (4.22) сокращается до четырех. Для получения однозначного решения необходимо задать восемь величин, например координаты установки амортизаторов. Выберем точки расположения амортизаторов с координатами (рис. 4.25): $x_1 = -x_2 = 25 \text{ см}$;

$y_1 = y_2 = 15 \text{ см}$; $-x_3 = x_4 = 20 \text{ см}$; $-y_3 = -y_4 = 12 \text{ см}$.

Система уравнений для расчета статических характеристик записывается в виде

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = mg,$$

$$P_1 x_1 + P_2 x_2 + P_3 x_3 + P_4 x_4 = 0,$$

$$P_1 y_1 + P_2 y_2 + P_3 y_3 + P_4 y_4 = 0$$

$$P_1 x_1 y_1 + P_2 x_2 y_2 + P_3 x_3 y_3 + P_4 x_4 y_4 = 0.$$

Ввиду того что амортизаторы расположены симметрично относительно плоскости yOz , ($P_1 = P_2$) $P_3 = P_4$, система уравнений упрощается и преобразуется:

$$2P_1 + 2P_3 = mg,$$

$$P_1 y_1 - 2P_3 = 0 \tag{4.23}$$

Из последних уравнений находим реакции амортизаторов $P_1 = P_2 = 55,6 \text{ Н}$, $P_3 = P_4 = 69,4 \text{ Н}$. Статические прогибы амортизаторов:

$$z_{1ct} = z_{2ct} = P/k_z = 55,6/32,3 = 1,12 \text{ мм},$$

$$z_{3ct} = z_{4ct} = P3/k_z = 69,4/32,3 = 2,14 \text{ мм}.$$

Толщина компенсирующих прокладок

$$\Delta = z_{3ct} - z_{1ct} = 2,14 - 1,12 = 0,42 \text{ мм}.$$

Частота свободных колебаний блока на амортизаторах вдоль оси z

$$f_{0z} = \frac{1}{2p} \sqrt{\frac{4k_z}{m}} = \frac{1}{6,28} \sqrt{\frac{4 \cdot 32,3 \cdot 10^3}{25}} = 11,4 \text{ Гц}$$

Частотная расстройка

$$v = f_H / f_{0z} = 30 / 11,4 = 2,63.$$

Приняв $\delta_0 = 0,25$, найдем коэффициент передачи вибраций

$$h = \frac{\sqrt{1 + 4d_0^2 v^2}}{\sqrt{4d_0^2 v^2 + (1 - v^2)^2}} =$$

$$= \frac{\sqrt{1 + 4(0,25 \cdot 2,63)^2}}{\sqrt{4(0,25 \cdot 2,63)^2 + (1 - 2,63)^2}} = 0,197$$

Эффективность виброизоляции

$$\Theta = (1 - \eta) \cdot 100\% = (1 - 0,197) \cdot 100 = 80,3\%.$$

Для обеспечения более высокой эффективности можно применить амортизаторы с меньшей жесткостью.

Исходные данные к задаче позволяют также найти амплитуду возбуждающего колебания, которая согласно (4.2) составит

$$Z_a = n_B g / (2\pi f_H)^2 = 10 \cdot 9,8 / (2 \cdot 3,14 \cdot 30)^2 = 2,76 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Тогда амплитуда перемещения блока

$$Z_B = \eta Z_a = 0,197 \cdot 2,76 \cdot 10^{-3} = 0,54 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

вибрационная перегрузка

$$n_B = (2\pi f_H)^2 Z_B / g = (2 \cdot 3,14 \cdot 30)^2 \cdot 0,54 \cdot 10^{-3} / 9,8 = 1,96,$$

а максимальное ускорение при вибрации равно 1,96g.

4.6. Основы расчета удароизоляции конструкций РЭС

Для защиты конструкций РЭС от ударов используются амортизаторы. Объект с амортизаторами представляет собой механическую колебательную систему. Удар вызывает сложное движение этой системы, характеристики которого зависят как от параметров системы, так и от

параметров удара, в частности от формы ударного импульса (см. рис. 4.1). Наиболее «жестким» по воздействию на систему является удар в виде прямоугольного импульса. Ударные импульсы с пологими фронтами (синусоидальный, треугольный, трапецеидальный) оказываются наиболее «мягкими». Поэтому прямоугольный и синусоидальный импульсы принято рассматривать как крайние случаи ударных воздействий, для которых производят расчет удароизоляции конструкции.

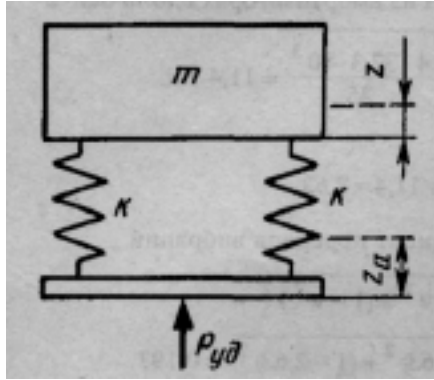


Рис. 4.26. Модель системы удароизо-

Модель системы удароизоляции конструкции приведена на рис. 4.26, где объект, подлежащий удароизоляции, представлен массой m , амортизаторы — жесткостью k . Ударный импульс воздействует на платформу, вызывая перемещение системы. В период времени, соответствующий длительности импульса τ , движение массы m носит вынужденный характер. После прекращения действия импульса ($t > \tau$) движение массы будет определяться законом свободных колебаний. При этом начальными условиями движения будут смещение и скорость в момент $t = \tau$.

В случае воздействия на систему синусоидального ударного импульса и отсутствия в системе неупругих сил уравнение перемещения массы на отрезке времени $0 < t < \tau$ имеет вид

$$\ddot{z}_1 + \omega_0^2 z_1 = a_{\max} \sin \omega t, \quad (4.24)$$

где $z_1 = z - z_a$ — смещение массы m относительно основания; z , z_a — соответственно смещение объекта (массы) и основания; $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ — частота свободных колебаний системы; k — суммарная жесткость амортизаторов; $\omega = \pi/\tau$ — условная частота возбуждения.

Для начальных условий $z_1(0) = \dot{z}_1(0) = 0$ решение (4.24) дает следующее выражение относительного перемещения объекта:

$$z_1 = \frac{a_{\max}}{w_0(w^2 - w_0^2)} (\sin w_0 t - w_0 \sin wt)$$

Тогда относительные скорость и ускорение объекта при ударе:

$$\dot{z}_1 = \frac{a_{\max} W}{W^2 - W_0^2} (\cos W_0 t - \cos W t). \quad (4.27)$$

$$\ddot{z}_1 = \frac{a_{\max} W}{W^2 - W_0^2} (W_0 \sin W_0 t - W \sin W t) \quad (4.26)$$

Абсолютное ускорение объекта во время действия удара

$$\ddot{z} = \ddot{z}_1 + a_{\max} \sin W t = \frac{a_{\max} W}{W^2 - W_0^2} (W \sin W_0 t - W_0 \sin W t)$$

Из уравнения движения массы после окончания удара ($t > \tau$)

$$\dot{z}_1 + \omega_0 z_1 = 0$$

следует решение для относительного перемещения массы:

$$z_1 = (v_{01}/\omega_0) \sin \omega_0 t - z_{01} \cos \omega_0 t, \quad (4.28)$$

где v_{01} и Z_{01} — относительные скорость и перемещение массы в конце ударного импульса ($t = \tau$); V_{01} и Z_{01} находят из выражений (4.26) и (4.25) при подстановке в них $t = \tau$:

$$z_{01} = \frac{a_{\max} W}{(W^2 - W_0^2) W_0} \sin W_0 \tau$$

$$v_{01} = \frac{a_{\max}}{W^2 - W_0^2} (\cos W_0 \tau + 1)$$

После замены в (4.28) z_{01} и v_{01} полученными для них выражениями решение имеет вид

$$z_1 = \frac{a_{\max} W}{(W - W_0) W_0} \cos \frac{W_0 t}{2} \sin \left(W_0 t - \frac{W_0 t}{2} \right) \quad (4.29)$$

Значение z_1 , определяемое согласно (4.29), представляет собой абсолютное перемещение объекта, так как на интервале времени $t > \tau$ основание неподвижно, т.е. $\mathbf{z}_a = \mathbf{0}$, $\mathbf{z}_1 = \mathbf{z}$.

В результате дифференцирования (4.29) можно найти ускорение объекта

$$\ddot{z} = -\frac{2a_{\max} w w_0}{(w^2 - w_0^2)} \cos \frac{w_0 t}{2} \sin \left(w_0 t - \frac{w_0 t}{2} \right) \quad (4.30)$$

Из анализа (4.29) и (4.30) следует, что движение удароизолируемого объекта отстает от движения основания на угол $\varphi = \omega_0 \tau / 2$. Максимальные значения перемещение z_{\max} и ускорение \ddot{z}_{\max} принимают в момент времени $t_m = \pi / 2 \omega_0 - \tau / 2$ (рис. 4.27):

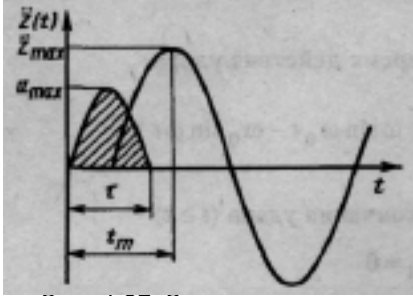


Рис. 4.27. Закон изменения ускорения при воздействии синусоидального ударного импульса

$$z_{\max} = \frac{2a_{\max}}{w_0} \frac{v}{v^2 - 1} \cos \frac{p}{2v} \quad (4.31)$$

$$\ddot{z}_{\max} = \frac{2a_{\max} v}{v^2 - 1} \cos \frac{p}{2v} \quad (4.32)$$

где $v = T / 2 \tau = \omega / \omega_0$ — частотная расстройка; T — период свободных колебаний объекта.

Из формулы (4.32) можно получить выражение коэффициента передачи при ударе

$$\eta_{\text{уд}} = \frac{\ddot{z}_{\max}}{\ddot{z}_{a_{\max}}} = \frac{z_{\max}}{z_{a_{\max}}} \frac{2v}{v^2 - 1} \cos \frac{p}{2v} \quad (4.33)$$

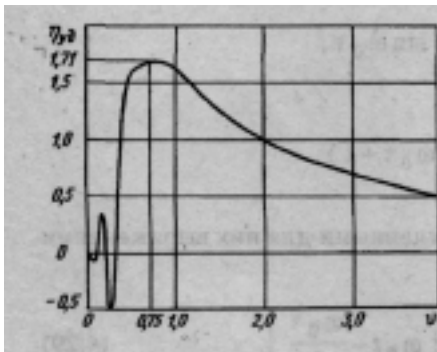


Рис. 4.28. Зависимость коэффициента удароизоляции от частотной

Зависимость $\eta_{\text{уд}}$ от частотной расстройки приведена на рис. 4.28. Максимум коэффициента передачи $\eta_{\text{уд}} = 1,71$ соответствует значению $v = 0,75$ или $T = 1,5\tau$. С ростом частотной расстройки $\eta_{\text{уд}}$ плавно уменьшается до нуля.

Аналогичный анализ воздействия прямоугольного ударного импульса позволяет получить следующие выражения для перемещения и ускорения удароизолируемого объекта и коэффициента передачи при ударе:

$$z = \frac{2a_{\max}}{w_0^2} \sin \frac{w_0 t}{2} \sin \left(w_0 t - \frac{w_0 t}{2} \right) \quad (4.34)$$

$$\ddot{z} = -2a_{\max} \sin \frac{w_0 t}{2} \sin \left(w_0 t - \frac{w_0 t}{2} \right) \quad (4.35)$$

$$h_{\text{уд}} = 2 \sin \left(\frac{p}{2\nu} \right) \quad (4.36)$$

Как следует из (4.36), максимальное значение коэффициент передачи $\eta_{\text{уд}}=2$ принимает при частотной расстройке $\nu = 1$. В интервале значений расстройки $\nu = 0..0.5$ наблюдается периодичность значения коэффициента передачи. При значениях $\nu > 1$ коэффициент передачи уменьшается и стремится к нулю (рис. 4.29).

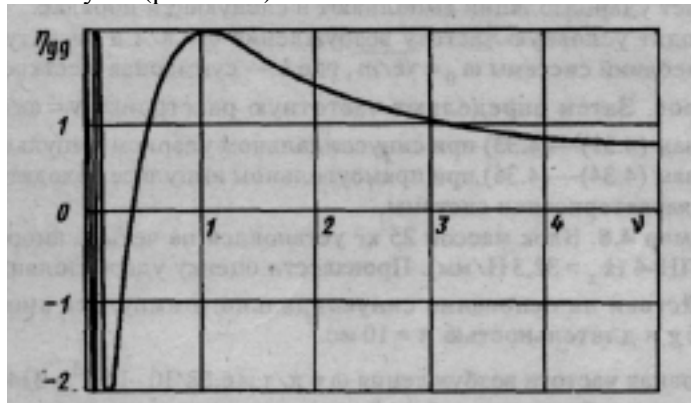


Рис. 4.29. Зависимость коэффициента удароизоляции от частотной расстройки при ударном импульсе прямоугольной формы

Принятое при анализе системы удароизоляции условие отсутствия в системе неупругих сопротивлений приводит к результатам, несколько отличающимся от характеристик реальных систем. Моделирование и экспериментальное исследование ударных воздействий показывают, что наличие в системах затухания ведет к некоторому снижению максимальных перемещений z_{\max} и коэффициента передачи при ударе $\eta_{\text{уд max}}$ по сравнению с теоретическими значениями и смещению максимумов в сторону меньших значений частотной расстройки ν .

Анализ зависимости коэффициента передачи при ударе $\eta_{\text{уд max}}$ от частотной расстройки ν (см. рис. 4.28 и 4.29) позволяет сделать вывод о том, что условия эффективных виброизоляции и удароизоляции конструкций не совпадают. Если виброизоляция конструкций обеспечивается при расстройках $\nu = 5..6$, то для смягчения ударов требуются более высокие значения ν . В то же время из (4.31) и (4.33) видно, что сни-

жение жесткости амортизаторов, позволяющее повысить частотную расстройку, при ударных воздействиях ведет к быстрому росту перемещений.

Расчет удароизоляции конструкций РЭС состоит в определении по исходным данным перемещения, ускорения и коэффициента передачи при ударе.

Исходными данными для расчета служат масса удароизолируемого объекта m , тип и параметры амортизаторов (жесткость амортизатора k_a), форма и характеристики (амплитуда a_{\max} и длительность τ) ударного импульса.

Расчет удароизоляции выполняют в следующем порядке.

Находят условную частоту возбуждения $\omega = \pi/\tau$ и частоту свободных колебаний системы $\omega_0 = \sqrt{k/m}$, где k — суммарная жесткость амортизаторов. Затем определяют частотную расстройку $v = \omega/\omega_0$ и по формулам (4.31)—(4.33) при синусоидальном ударном импульсе или по формулам (4.34)—(4.36) при прямоугольном импульсе находят динамические характеристики системы.

Пример 4.6. Блок массой 25 кг установлен на четыре амортизатора типа АПН-4 ($k_z = 32,3$ Н/мм). Произвести оценку удароизоляции блока при действии на основание синусоидального импульса амплитудой $a_{\max} = 6$ g и длительностью $\tau = 10$ мс.

Условная частота возбуждения $\omega = \pi/\tau = 3,14/10 \cdot 10^{-3} = 314$ Гц.

Частота свободных колебаний системы удароизоляции

$$\omega_0 = \sqrt{k/m} = \sqrt{4 \cdot 32,3 \cdot 10^3 / 25} = 71,8 \text{ Гц} = \sqrt{4 \cdot 32,3 \cdot 10^3 / 25} = 71,8 \text{ Гц.}$$

Частотная расстройка $v = \omega/\omega_0 = 314/71,8 = 4,37$.

По формуле (4.33) находим коэффициент передачи при ударе

$$h_{y\partial} = \frac{2v}{v^2 - 1} \cos \frac{p}{2v} = \frac{2 \cdot 4,37}{(4,37)^2 - 1} \cos \frac{p}{8,74} = 0,46$$

Максимальное ускорение блока $\ddot{z}_{\max} = \eta_{y\partial} a_{\max} = 0,46 \cdot 6 \text{ g} = 2,74 \text{ g}$.

Максимальное смещение при ударе

$$z_{\max} = \frac{a_{\max}}{(w_0)^2} h_{y\partial} = \frac{6 \cdot 9,8}{(71,8)^2} \cdot 0,46 = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Полученное значение смещения блока не превышает допустимой величины прогиба амортизатора. Другие динамические характеристики также свидетельствуют о правильности заданных параметров системы удароизоляции.

4.7. Конструктивные способы защиты РЭС от механических воздействий

Вибро- и ударозащита конструкций РЭС с помощью амортизаторов, применяется в конструкциях третьего и более высокого структурного уровня (блоки, устройства и т.д.). Это обусловлено тем, что номинальная нагрузка даже легких амортизаторов может быть обеспечена начиная с уровня блока, а конструктивные потери за счет увеличения массы и объема конструкции становятся менее заметными.

В то же время ряд эффективных мер защиты конструкций от механических воздействий может быть применен при разработке микросборок и функциональных узлов. Эти меры имеют конкретное конструктивное воплощение, типичное для каждого структурного уровня, и направлены на повышение демпфирующих свойств и жесткости конструкций.

При конструировании микросборок предусматривается вибро- и удароизоляция компонентов. Для уменьшения коэффициента передачи механических воздействий, приложенных к подложке, компоненты (бескорпусные полупроводниковые приборы, интегральные микросхемы и др.) закрепляются на подложке с помощью вибропоглощающего клея. После полимеризации клей остается эластичным, поэтому система «компонент — клеевая прослойка — подложка» может быть представлена моделью механической колебательной системы с кинематическим возбуждением (см. рис. 4.6). Перечень применяемых клеев достаточно широк, но чаще всего используются клеи КВК-68, ВК-9 и МК-400.

Другим решением, способствующим повышению вибропрочности микросборок, является ограничение длины гибких выводов компонентов и проволочных перемычек. Проволочный вывод компонента и перемычка могут быть представлены моделью балки круглого сечения с жестким закреплением на концах. Поэтому ограничение на длину балки является ограничением снизу частоты свободных колебаний из условия вибропрочности конструкции. Допустимая длина вывода (перемычки между двумя точками закрепления) определяется из неравенства $l \leq 100d$, где d — диаметр вывода перемычки. Перемычка монтируется без натяжения, однако начальный ее прогиб (консольность) не должна превышать $10d$.

На втором структурном уровне (функциональные узлы) устойчивости конструкций к механическим воздействиям добиваются за счет использования вибропоглощающих адгезионных материалов и сред, а также за счет различных способов повышения жесткости конструкций. Так, например, для уменьшения амплитуды резонансных колебаний пе-

чатных плат часто применяются вибропоглощающие слои. Показано [27], что коэффициент динамичности печатной платы, состоящей из трех слоев стеклотекстолита с вибропоглощающими прокладками между слоями, снижается приблизительно в восемь раз без заметного увеличения массы и габаритов.

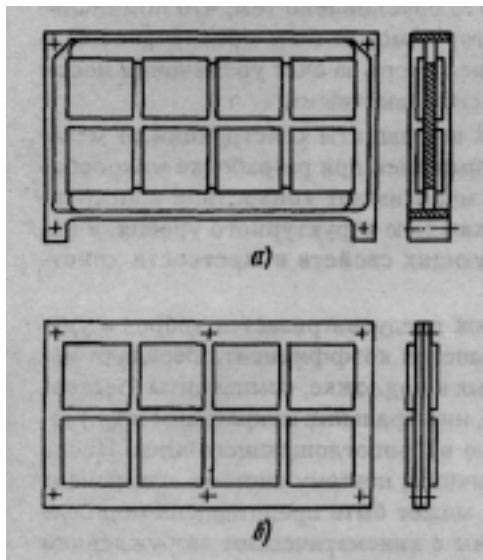


Рис. 4.30. Конструкция функциональных ячеек с низким коэффициентом динамичности: а — двухсторонняя на

Другим примером применения вибропоглощающих слоев служит конструкция односторонней функциональной ячейки на бескорпусных микросборках. Микросборки и печатная плата закрепляются на металлической рамке с помощью демпфирующего компаунда КТ-102.

Использование компаунда КТ-102 в качестве адгезива в конструкции двухсторонней функциональной ячейки на микросборках (рис. 4.30, а) и двухсторонней ячейки на печатных платах, соединенных между собой клеем КВК-68 (рис. 4.30, б), позволяет получить конструкции с коэффициентом динамичности $\mu = 3$.

Заливка узла со стороны радиоэлементов вибропоглощающим пенополиуретаном снижает амплитуду резонансных колебаний более чем в 10 раз. Ухудшение ремонтпригодности и условий теплообмена таких конструкций можно в значительной мере исключить, применяя слои сложной конфигурации, обеспечивающие неполное покрытие элементов и доступ к отдельным точкам платы (рис. 4.31).

Повышение жесткости конструкций ведет к смещению спектра частот свободных колебаний за верхнюю границу диапазона частот внешних воздействий и позволяет исключить резонансные явления. Для полного устранения резонансных колебаний необходимо, чтобы частота свободных колебаний основного тона была не менее чем на октаву выше верхней частоты внешних воздействий, т.е. $f_{01} / f_b \geq 2$.

Управлять жесткостью конструкций функциональных узлов можно выбором способа закрепления плат, геометрических размеров, применением в конструкции ребер жесткости, обечаек, рамок.

Связь способа закрепления пластин и частоты свободных колебаний устанавливается формулами (4.17) и (4.19) через параметры a и C соответственно. Количественную оценку этой связи можно получить из табл. 4.4 и 4.5. Так, например, из данных табл. 4.5 следует, что для пластины с отношением сторон $a/b = 1$ переход от свободного опирания к жесткому закреплению всех сторон ведет к росту частотной постоянной C приблизительно в 1,8 раза. Для других отношений сторон значение C возрастает примерно в 2,1 раза.

Зависимость частоты свободных колебаний прямоугольной пластины от размера сторон иллюстрируется графиком на рис. 4.32. График построен для пластины с отношением сторон $a/b = 1$ при свободном опирании по всем сторонам (частотная постоянная $C = 45,8$ и толщина пластины $h = 1$ мм). Начальный размер пластины $a_n = 100$ мм. Из графика видно, что частота свободных колебаний уменьшается в четыре раза при увеличении размера стороны в два раза.

На рис. 4.33 приведена зависимость относительного изменения частоты свободных колебаний той же пластины от отношения сторон a/b . Нормирование частоты произведено относительно начального значения f_{01n} для $a = b = 100$ мм.

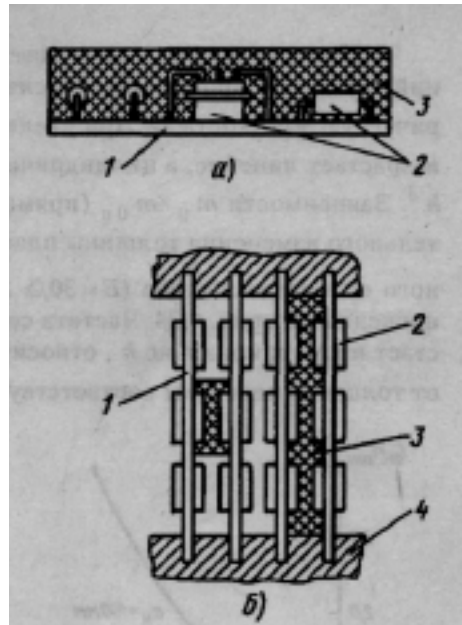
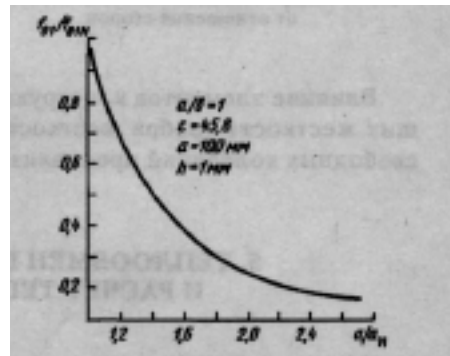


Рис. 4.31. Применение вибропоглощающих материалов в конструкциях РЭС:
a — заливка узла пенополиуританом;
б — заполнение межпластного пространства вибропоглощающим материалом;
 1 — плата; 2 — радиоэлемент;



3 — вибропоглощающий материал;
 4 — направляющие

Рис. 4.32. Зависимость частоты свободных колебаний платы от размера стороны

Толщина пластины h пересчитывается в частоту свободных колебаний через нормированную относительно площади массу m_0 и цилиндрическую жесткость D . При увеличении толщины пластины масса m_0 возрастает линейно, а цилиндрическая жесткость — пропорционально h^3 . Зависимости m_0/m_{0H} (прямая 1) и D/D_H (кривая 2) от относительного изменения толщины пластины ($h_H=0,5$ мм) из фольгированного стеклотекстолита ($E = 30,2 \cdot 10^9$ Па, $\rho=1,85 \cdot 10^3$ кг/м³, $\epsilon=0,22$) приведены на рис. 4.34. Частота свободных колебаний пластины возрастает пропорционально h , относительное изменение частоты f_{01}/f_{01H} от толщины пластины соответствует прямой 1.

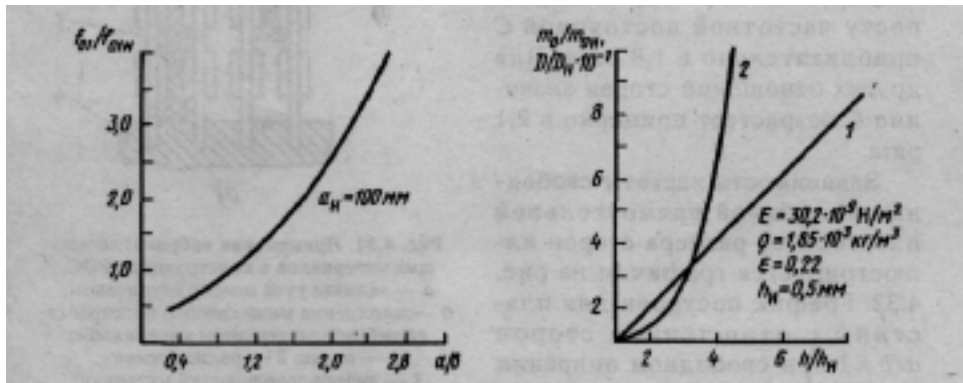


Рис. 4.33. Зависимость частоты свободных колебаний пластины от отношения сторон

Рис. 4.34. Зависимость нормированной массы и жесткости пластины от ее толщины

Влияние элементов конструкции функциональных узлов, повышающих жесткость (ребра жесткости, рамки, обечайки и др.), на частоту свободных колебаний проанализировано в разд. 4.3.4.

5. ТЕПЛОБМЕН В КОНСТРУКЦИЯХ РЭС И РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

Конструкции РЭС как преобразователи электрической энергии в большинстве случаев обладают низкими коэффициентами полезного действия. Поэтому в процессе работы РЭС большая часть подводимой электрической энергии преобразуется в тепло, которое расходуется на

нагревание узлов и деталей и частично рассеивается в окружающее пространство. Общий баланс энергии в РЭС можно выразить уравнением

$$E_{\Pi} = E_1 + E_2 + E_3,$$

где E_{Π} — энергия, отбираемая устройством от источников питания; E_1 — полезная энергия; E_2 — энергия, рассеиваемая в окружающее пространство; E_3 — тепловая энергия, вызывающая нагревание деталей и узлов.

Известно, что повышение температуры способствует росту интенсивности отказов радиоэлементов и вызывает ускоренное старение конструкционных материалов. По этой причине при разработке конструкций РЭС стремятся обеспечить хороший теплообмен аппарата с окружающей средой, т.е. в пределах возможного снизить величину E_3 или улучшить отношение E_2 / E_3 .

Миниатюризация РЭС способствует значительному снижению потребления энергии от источников питания. Однако уменьшение габаритов РЭС в конечном счете ведет к росту отношения выделяемой тепловой энергии к энергии, рассеиваемой в окружающее пространство. Поэтому проблема обеспечения тепловых режимов в современных РЭС не утрачивает своей актуальности. Напротив, допустимый нагрев элементов конструкции становится одним из основных ограничивающих факторов на пути дальнейшего улучшения массогабаритных характеристик РЭС.

5.1. Основы теории теплообмена в РЭС

5.1.1. Основные понятия и определения

Под тепловым режимом РЭС понимают пространственно-временное распределение температуры в пределах конструкции. Количественно тепловой режим РЭС принято характеризовать температурным полем и перегревом.

Температурным полем называют совокупность численных значений температуры в различных точках конструкции в определенный момент времени.

Температурное поле называется стационарным, если температуры во всех точках конструкции постоянны во времени. Если температуры во всех точках системы в любой момент времени равны между собой, то поле называется равномерным. Стационарное температурное поле характеризует стационарный тепловой режим.

Тепловой режим РЭА считается нормальным, если выполняются следующие условия:

температуры всех деталей и узлов конструкции при заданных условиях эксплуатации не превышают предельно допустимых температур, указанных в ТУ на детали и узлы,

температуры всех деталей и узлов конструкции таковы, что обеспечивается работа радиоустройства с заданной точностью и надежностью.

Перегревом принято называть разность между температурой некоторой точки (области) конструкции радиоустройства и температурой окружающей среды.

Конструкции РЭС представляют собой систему тел с источниками и стоками тепловой энергии, сложным образом распределенных во времени и пространстве. Как правило, эти тела имеют различные теплофизические параметры и четко ограниченные границы и называются неоднородными телами. В отличие от неоднородных тел тела с одинаковыми теплофизическими параметрами называют однородными. Последние, в свою очередь, подразделяются на изотропные и анизотропные.

Изотропными называют тела, физические параметры которых во всех точках тела одинаковы.

Анизотропными называют тела, теплофизические параметры которых различны по направлениям осей координат.

Между телами (элементами), составляющими конструкцию, происходит теплообмен, т.е. перенос тепловой энергии из одной части конструкции в другую или в окружающую среду. Тепло передается от нагретых тел к телам с более низкой температурой.

Часть конструкции РЭС, в которой сосредоточены источники тепловой энергии, называется нагретой зоной (шасси с расположенными на нем элементами, блоки функциональных узлов и др.)

В конструкциях (в общем случае в однородных и неоднородных телах) можно выделить поверхности, в любой точке которых температуры одинаковы или условно одинаковы. Такие поверхности принято называть изотермическими.

Теплообмен между нагретыми телами и окружающей средой, т.е. между конструкциями и средой, количественно характеризуется тепловым потоком и его плотностью.

Тепловым потоком называется количество тепла Q , передаваемое от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой (в общем случае к среде) в единицу времени t , т.е.

$$P = Q/t.$$

Тепловой поток, отнесенный к площади изотермической поверхности, называют плотностью теплового потока

$$q = Q/(\tau S) = P/S,$$

где S — площадь изотермической поверхности.

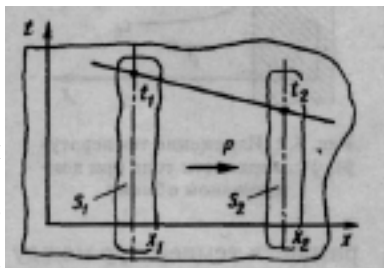
В общем случае теплообмен осуществляется с помощью трех видов передачи тепла: теплопроводностью, конвекцией и излучением.

5.1.2. Передача тепла теплопроводностью

Теплопроводностью (кондукцией) называют перенос тепловой энергии при соприкосновении частиц вещества или отдельных тел, имеющих разные температуры.

Процесс передачи тепловой энергии теплопроводностью обычно связывают с твердыми телами, но при определенных условиях он наблюдается также в жидкостях и газах.

При математическом описании процесса теплопередачи принято считать, что теплообмен происходит между изотермическими поверхностями, причем изотермическая поверхность с большей температурой отдает тепло изотермическим поверхностям с меньшей температурой.



Если температурное поле изменяется только в одном направлении (рис. 5.1), то полный тепловой поток P , передаваемый от изотермической поверхности S_1

к изотермической поверхности S_2 , на основании закона Фурье может быть записан в виде

$$P_T = \frac{\lambda S}{l}(t_1 - t_2) \quad (5.1)$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала; S — площадь средней изотермической поверхности: $S = 0,5(S_1 + S_2)$; t_1, t_2 — температуры изотермических поверхностей S_1, S_2 ; $l = x_2 - x_1$ — расстояние между изотермическими поверхностями.

Произведя замену $\lambda/l = a_T$, из (5.1) получим:

$$P_T = a_T S(t_1 - t_2), \quad (5.2)$$

где a_T — коэффициент теплопередачи кондукцией.

Значения коэффициентов теплопроводности наиболее распространенных конструкционных материалов приведены в табл. П.3 приложения.

5.1.3. Передача тепла конвекцией

Процесс теплообмена между поверхностью твердого тела с температурой t_1 и некоторой газообразной или жидкой средой с температурой

$t_2=t_c$ обусловленный естественным или принудительным перемешиванием среды около поверхности, носит название конвективного теплообмена.

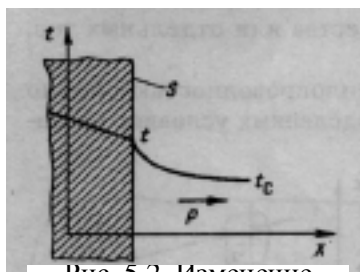


Рис. 5.2. Изменение температуры у поверхности тела при

Полный тепловой поток, отдаваемый изотермической поверхностью S среде за счет конвекции (рис. 5.2), определяется в соответствии с законом Ньютона следующим образом:

$$P_k = \alpha_k S (t_1 - t_2), \quad (5.3)$$

где α_k — коэффициент конвективного теплообмена.

Коэффициент α_k представляет собой тепловой поток с единицы поверхности твердого тела в окружающую среду при разности температур между телом и средой в один градус.

В общем случае α_k зависит от температур t_1 и t_2 и ряда физических констант среды:

$$\alpha_k = f(t_1, t_2, \beta, \lambda, C_p, \nu, a, g, \Phi),$$

где β — коэффициент объемного расширения среды (жидкости или газа), K^{-1} ; λ — коэффициент теплопроводности, или просто теплопроводность среды, $Вт/(м \cdot K)$; C_p — удельная теплоемкость среды при определенном давлении, $Дж/(кг \cdot K)$; ν — коэффициент кинематической вязкости среды, $м^2/с$; g — ускорение силы тяжести, $м/с^2$; $a = \lambda / C_p \rho$ — температуропроводность среды, $м^2/с$; ρ — плотность среды, $кг/м^3$; Φ — совокупность параметров, характеризующих форму и поверхность тел.

Зависимость физических констант среды от температур t_1 и t_2 и бесконечное разнообразие форм поверхности нагретых тел исключают возможность получения табличных значений конвективных коэффициентов теплопередачи как теоретическими, так и экспериментальными методами.

Поэтому для определения α_k используются основные положения теории подобия. Согласно этой теории сложные процессы характеризуются

ются не отдельными частными параметрами, а обобщенными, представляющими собой безразмерные комплексы размерных физических величин. Если значения обобщенных параметров находятся в определенном диапазоне величин, то процессы (явления) считаются подобными. В теории теплообмена используются четыре обобщенных параметра (критерия), каждый из которых выражается через определенное количество физических параметров среды. Знание критериев позволяет без особых затруднений найти α_k .

Критерии подобия (критериальные уравнения). Для определения конвективного коэффициента теплопередачи в условиях естественной и принудительной (вынужденной) конвекции достаточно определить: критерий Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha_k L}{l} \quad (5.4)$$

где L — определяющий геометрический размер тела (внутренний диаметр трубы, высота цилиндра или вертикальной стенки, наименьшая сторона горизонтально расположенной поверхности и т.п.);

критерий Грасгофа

$$Gr = bg \frac{L^3}{\nu^2} (t_1 - t_2) \quad (5.5)$$

критерий Прандтля

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (5.6)$$

критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{\nu L}{\nu} \quad (5.7)$$

где ν — скорость движения газа или жидкости при вынужденной конвекции.

Из (5.4) видно, что коэффициент α_k выражается через критерий Нуссельта. В зависимости от условий конвективного теплообмена α_k определяется одним из рассматриваемых далее способов.

Определение α_k при естественной конвекции в неограниченном пространстве. Данный случай характерен для теплопередачи от корпуса блока или устройства в окружающую среду. Критерий Нуссельта вычисляется с помощью соотношения

$$Nu = C(GrPr)^n, \quad (5.8)$$

где C и n — показатели теплообмена, которые приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

$(GrPr)^{\wedge}$	C	n	Режим движения газа (жидкости)
10^{-3}	0,5	0	Пленочный поток
$10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8	Ламинарный
$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4	Переходный
$2 \cdot 10^7 \dots 10^8$	0,136	1/3	Вихревой (турбулентный)

Показатель степени n характеризует режим движения газа (жидкости). Виды потоков, соответствующих различным значениям, условно показаны на рис. 5.3.

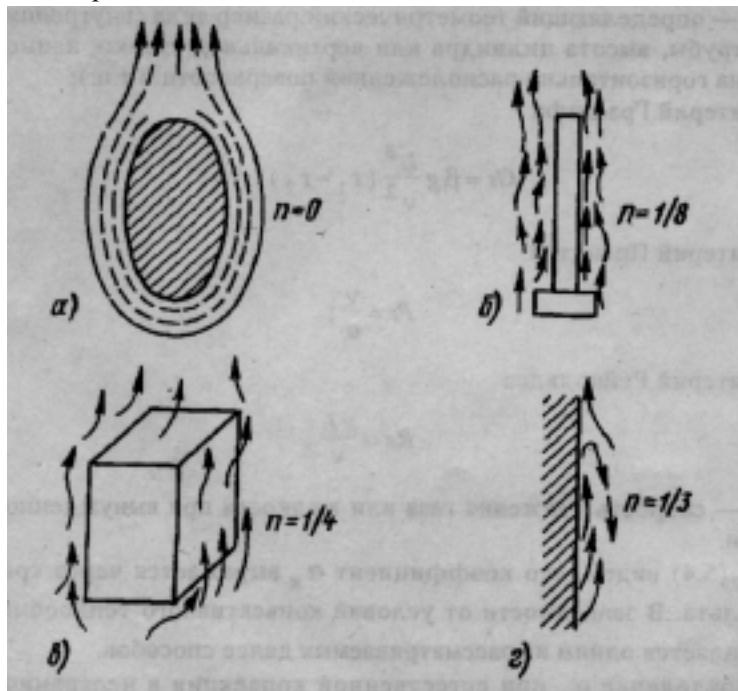


Рис. 5.3. Характер движения теплоносителя у поверхности нагретых тел: а — пленочный поток; б — ламинарный поток; в — переходный режим; г — вихревой режим

С увеличением n поток становится менее направленным и более интенсивным и передача тепла увеличивается. Интенсивность теплопередачи в значительной мере зависит от температуры поверхности тела, физических свойств среды и в меньшей степени — от объема и формы тела.

Таким образом, для определения α_k при естественной конвекции в неограниченном пространстве необходимо:

в табл. П.5 приложения взять значения физических констант среды для средней температуры

$$t_{cp} = 0,5(t_1 + t_c),$$

рассчитать критерий Gr и Pr и найти их произведение:

из табл. 5.1 определить показатели теплообмена, по формуле (5.8) — критерий Nu и с помощью формулы (5.4) — коэффициент α_k .

Применение критериальных уравнений при анализе теплообмена тел в случае естественной конвекции в неограниченном пространстве позволяет получить формулы для непосредственного определения конвективного коэффициента теплопередачи в воздушной среде. Тела ограничиваются плоскими, цилиндрическими и сферическими поверхностями. Каждое тело характеризуется определяющим, размером L и ориентацией поверхности в пространстве — коэффициентом N .

Если определяющий размер L и разность температур поверхности теплообмена и окружающей среды $t_1 - t_c$ удовлетворяют неравенству

$$(t_1 - t_c) < [840 / (L \cdot 10^{-3})]^3, \quad (5.9)$$

то движение воздуха подчиняется закону степени 1/4 (переходный режим), в противном случае имеет место теплообмен по закону степени 1/3 (вихревой режим).

Расчет конвективного коэффициента теплопередачи для переходного режима производят по формуле

$$\alpha_k = (1,42 + 1,4 \cdot 10^{-3} t_{cp}) N [(t_1 - t_c) / L]^{1/4}, \quad (5.10)$$

для вихревого режима — по формуле

$$\alpha_k = (1,67 + 3,6 \cdot 10^{-3} t_{cp}) N (t_1 - t_c)^{1/3}, \quad (5.11)$$

где $t_{cp} = 0,5(t_1 + t_c)$ — средняя температура окружающей среды.

Значения коэффициента N приведены в табл. 5.2

Таблица 5.2

Вид поверхности	Определяющий размер	Значение N
Сферическая, горизонтальные цилиндры	Диаметр	1,0
Вертикальные пластины и цилиндры	Высота	1,0
Горизонтальные пластины, рассеивающие потоки: вверх, вниз	Максимальный размер	1,3 0,7

Формулы (5.9)—(5.11) позволяют при анализе теплового режима конструкций РЭС в форме прямоугольного параллелепипеда представить кожух моделями горизонтальных и вертикальных пластин и рассчитать конвективный коэффициент теплопередачи от каждой стенки кожуха.

Определение α_k при естественной конвекции в ограниченном пространстве. Данный случай отражает процесс теплообмена между внутренними, размещенными в корпусе, элементами конструкции РЭС за счет естественного движения газа (жидкости) в каналах теплообмена. Такими каналами являются воздушные прослойки между кожухом и нагретой зоной, зазоры между функциональными ячейками и т.п. Характер движения газа (жидкости) в каналах показан на рис. 5.4.

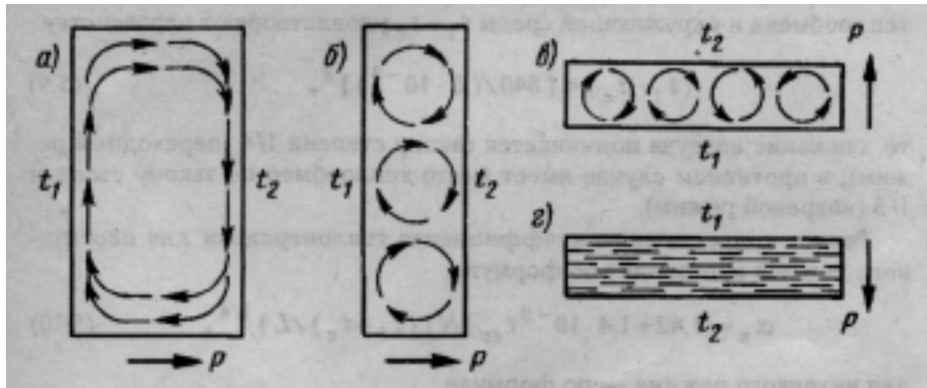


Рис. 5.4. Характер движения теплоносителя в каналах теплообмена:
a — конвективный поток в широком канале;
б, в — локальные конвективные потоки в узких каналах;
г — отсутствие конвекции

Процесс конвективного теплообмена в ограниченном пространстве более сложен, так как происходит одновременное нагревание газа

(жидкости), холодной стенки и охлаждение нагретой. При этом эффективность конвекции зависит от разности температур нагретой и холодной стенок канала Δt и расстояния между стенками δ . Так, например, в воздушных прослойках толщиной более 10 мм конвекция наступает при перегреве $\Delta t = 0,3^\circ\text{C}$. В прослойках до 10 мм конвективное движение воздуха наблюдается, если $\Delta t > 5^\circ\text{C}$. В прослойках с толщиной менее 5 мм конвективный теплообмен возникает, если Δt не ниже 100°C . Для упрощения расчетов конвективного коэффициента теплопередачи в ограниченном пространстве предполагается, что тепло от нагретой стенки к холодной передается за счет теплопроводности среды, находящейся между стенками. При этом теплофизические свойства среды характеризуют эквивалентным коэффициентом теплопроводности

$$\lambda_3 = \kappa_{\text{п}}\lambda, \quad (5.12)$$

где $k_n = f(GrPr)$ — поправочный коэффициент на конвективный теплообмен в прослойке (коэффициент конвекции); λ — коэффициент теплопроводности среды при среднearифметической температуре поверхностей $t_{\text{CP}} = 0,5(t_1 + t_2)$; t_1, t_2 — соответственно температуры нагретой и холодной стенок.

Соотношения для расчета коэффициента теплообмена в ограниченном пространстве получены [19] в результате моделирования теплопередачи между поверхностями, разделенными газовой или жидкостной прослойкой толщиной δ , и в прямоугольном параллелепипеде, одна грань которого с размерами l_1, l_2 имеет температуру t_1 , остальные — температуру t_2 , причем $t_1 > t_2$ (рис. 5.5).

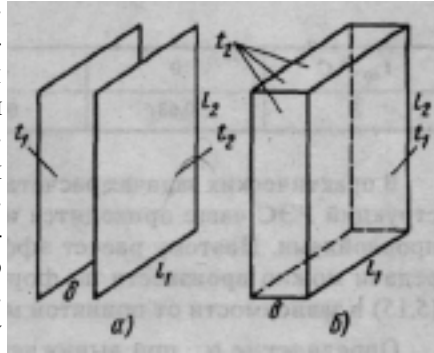


Рис. 5.5. Моделирование ограниченного пространства:

a — прослойка между плоскими стенками; b — прямоугольный параллелепипед. Эффективные коэффициенты теплопередачи в плоской, цилиндрической и сферической прослойках находят согласно выражениям:

$$a_{\text{кп}} = \frac{\kappa_{\text{п}} l}{d}; a_{\text{кц}} = \frac{2\kappa_{\text{п}} l}{d_1 \ln(d_2 / d_1)}; a_{\text{кс}} = \frac{2\kappa_{\text{п}} l d_2}{d d_1}$$

где d_1, d_2 — диаметры внутреннего и внешнего цилиндров (сфер).

Для неограниченных плоских, цилиндрических и сферических прослоек коэффициент конвекции $k_n = 1$ при условии $GrPr \leq 10$. Если произведение $GrPr > 10^3$, то коэффициент конвекции приближенно можно найти по формуле

$$k_n = 0,18(GrPr)^n, \quad (5.14)$$

где $n = 0,25$ — показатель теплообмена.

Эффективный коэффициент теплопередачи через воздушную прослойку в прямоугольном параллелепипеде (см. рис. 5.5) определяется из выражения

$$a_{к.п.} = N \left[6.25 - 5.25(1 + d / \sqrt{l_1 l_2})^{-5/3} \right] B^4 \sqrt{\Delta t / d} \quad (5.15)$$

где δ — толщина прослойки; $N = 1$ и $N = 1,3$ — коэффициенты для вертикальной и горизонтальной ориентации прослойки соответственно, причем в случае горизонтальной ориентации нагретая грань параллелепипеда находится внизу; B — коэффициент, зависящий от средней температуры воздуха в прослойке $t_{CP} = 0,5(t_1 + t_2)$.

Значения коэффициента B приведены в табл. 5.3

Таблица 5.3

тср. °С	0	50	100	200
B	0,63	0,58	0,56	0,44

В практических задачах расчета показателей теплового режима конструкций РЭС чаще приходится иметь дело с плоскими воздушными прослойками. Поэтому расчет эффективного коэффициента теплопередачи можно произвести по формулам (5.13) совместно с (5.14) или (5.15) в зависимости от принятой модели.

Определение α_k при вынужденной конвекции. Вынужденная конвекция обусловлена принудительным перемещением жидкости или газа относительно поверхности нагретого тела; появляется в результате работы вентиляторов, воздуходувок, жидкостных насосов и т.п. Расчет конвективного коэффициента теплопередачи сводится к определению режима движения жидкости или газа и критерия Нуссельта.

Режим движения жидкости (газа) зависит от критерия Рейнольдса: для ламинарного потока — $Re < 2200$, для переходного — $2200 \leq Re \leq 10^4$, для вихревого — $Re \geq 10^4$. Ввиду того что переходный режим соответствует относительно малой области значений числа Рей-

нольдса, расчеты теплообмена при вынужденной конвекции проводят для двух режимов: ламинарного и вихревого. Переход от ламинарного режима к вихревому определяют по значению критического числа $Re_{кр} = 5 \cdot 10^5$.

Скорость принудительного движения жидкости (газа), от которой зависит число Re , находят через объемный расход жидкости (газа) G_v в системе охлаждения и площадь среднего сечения потока $A_{ср}$:

$$V = G_v / A_{ср}. \quad (5.16)$$

Для систем принудительного воздушного охлаждения в качестве параметра $A_{ср}$ выступает средняя площадь сечения воздушного канала, для жидкостного принудительного охлаждения — площадь сечения трубы.

В схеме расчета α_k при вынужденной конвекции критерий Nu вычисляется через критерий Re . Однако подход к определению критерия Nu зависит как от режима движения жидкости (газа), так и от условий взаимодействия потока и охлаждаемой поверхности. Поэтому выделяют вынужденную конвекцию при внешнем обтекании тел и вынужденную конвекцию в каналах и трубах. В свою очередь, при внешнем обтекании тел рассматривают случаи продольного и поперечного движений потока жидкости или газа.

Анализ конвективной теплопередачи при продольном внешнем обтекании тел производится на модели в виде теплоотдающей стенки, ориентированной вдоль потока, движущегося со скоростью v при температуре t_f (рис. 5.16). Определяющим является размер стенки вдоль потока L .

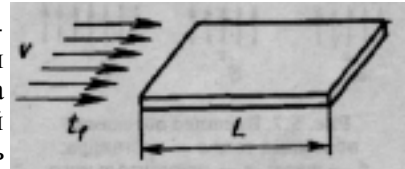


Рис. 5.6. Продольное внешнее

При ламинарном движении жидкости, когда $Re_f < 5 \cdot 10^5$, выражение для расчета критерия Нуссельта имеет вид

$$Nu_f = 0,66 Re_f^{0,5} Pr_f^{0,43} (Pr_f / Pr_w)^{0,25}, \quad (5.17)$$

где индексы f и w означают, что соответствующие критерии определены для температуры потока и температуры стенки. В выражении (5.17) влияние физических свойств жидкости и их зависимость от температуры учитываются параметром $Pr_f^{0,43}$, а влияние направления теплового потока и род жидкости — параметром $(Pr_f / Pr_w)^{0,25}$.

Для воздуха в широком диапазоне температур $Pr_f = Pr_w = 0,7$, поэтому формула (5.17) преобразуется к виду

$$Nu_f = 0,57\sqrt{Re_f} \quad (5.18)$$

В случае вихревого движения жидкости ($Re_f \geq 5 \cdot 10^5$) расчет критерия Нуссельта производится по формуле

$$Nu_f = 0,031 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr_f/Pr_w)^{0,25}. \quad (5.19)$$

Преобразование (5.19) с учетом приведенного выше условия дает формулу расчета критерия Нуссельта при вихревом движении воздуха:

$$Nu_f = 0,032 Re_f^{0,8} \quad (5.20)$$

В приближенных расчетах формулы (5.17) и (5.19) можно использовать для анализа теплообмена цилиндрических поверхностей, омываемых продольным потоком жидкости [19].

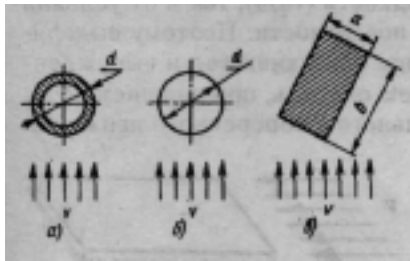


Рис. 5.7. Внешнее обтекание объемных тел: a — цилиндра;

Поперечное движение потока характерно для внешнего обтекания объемных тел различных геометрических форм воздухом. В качестве определяющего размера тела принимается длина обтекания L тела потоком воздуха. Длина обтекания для цилиндра и шара составляет $L = 0,5\pi d$, для прямоугольного параллелепипеда — $L = a + b$ (рис. 5.7).

При значениях числа Рейнольдса $10 < Re < 10^5$ приближенное выражение для расчета критерия Нуссельта

может быть записано в виде

$$Nu_f = 0,8\sqrt{Re_f} \quad (5.21)$$

Формула (5.21) применяется при расчете конвективного коэффициента теплообмена тел, находящихся в замкнутом пространстве и омываемых поперечным потоком воздуха. Определяющий размер в этом случае находят согласно рис. 5.7, а скорость движения воздуха относительно поверхности тела определяется по формуле (5.16).

Для конструкции РЭС с неупорядоченным расположением элементов площадь среднего сечения потока A_{CP} и определяющий размер (длина обтекания) L могут быть оценены по формулам:

$$, A_{CP} = A_K(1 - K_3); L = \sum_{i=1}^n L_i S_i / \sum_{i=1}^n S_i \quad (5.22)$$

где A_K — площадь сечения кожуха конструкции в направлении, перпендикулярном потоку воздуха; $K_3 = V_{эл}/V_K$ — коэффициент заполнения; $V_{эл}$, V_K — объемы элементов и кожуха конструкции соответственно; L_i , S_i — длина обтекания и площадь теплоотдающей поверхности i -го элемента.

Анализ вынужденного конвективного теплообмена в каналах производится на модели, изображенной на рис. 5.8,а. Канал образован расположенными на расстоянии h друг от друга плоскими гладкими стенками, на которых равномерно распределены источники тепла. По каналу протекает воздушный охлаждающий поток, объемный расход которого G_V в поперечном сечении на входе в канал постоянен.

Исследования показали [18, 19], что на начальном участке канала $x < l_H$ формируется профиль скорости и температуры потока, толщина пограничного слоя постепенно увеличивается от нуля до $h/2$. На этом участке критерий Нуссельта и, следовательно, коэффициент теплопередачи стенок зависят от длины канала x (рис. 5.8, б). При $x \geq l_H$ пограничные слои потока смыкаются, наступает режим стабилизированного движения воздушного потока, критерий Нуссельта принимает постоянное значение Nu_∞ .

Изменение критерия Нуссельта по длине канала вызывает необходимость расчета среднего значения \check{Nu} , с помощью которого определяется конвективный коэффициент теплопередачи.

При ламинарном движении воздуха ($Re < 2200$) длина начального участка канала $l_H = 0,01hRe$, $Nu_\infty = 4,12$. Среднее значение критерия Нуссельта для канала малой длины ($L_K \leq l_H$) определяют по формуле [19]

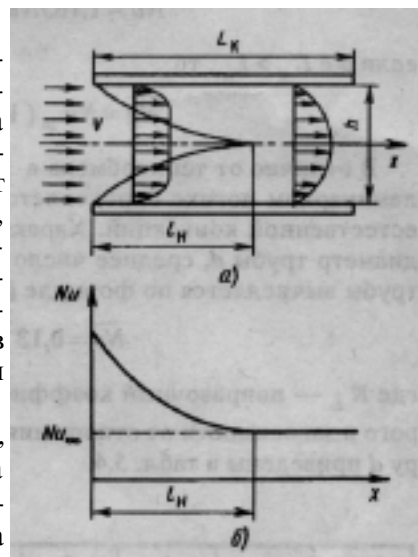


Рис. 5.8. Вынужденная конвекция в плоском канале: а — распределение

$$\overline{Nu} = 1.5 Nu_{\infty} \sqrt{l_H / L_K} \quad (5.23)$$

Для длинных каналов ($L_K > l_H$)

$$\overline{Nu} = Nu_{\infty} (1 + 0.5 l_H / L_K) \quad (5.24)$$

При вихревом режиме движения воздуха ($l_H = 40 h$) $Nu_{\infty} = 0,19 Re^{0,8}$. Среднее значение критерия Нуссельта в случае $L_K \leq l_H$ находят как

$$\overline{Nu} = 1,165 Nu_{\infty} (l_H / L_K) \quad (5.25)$$

если же $L_K > l_H$ то

$$\overline{Nu} = Nu_{\infty} (1 + 0.5 l_H / L_K)$$

В отличие от теплообмена в каналах теплообмен внутри трубы при ламинарном потоке определяется факторами как вынужденной, так и естественной конвекции. Характерным размером служит внутренний диаметр трубы d , среднее число Нуссельта для воздуха по всей длине трубы вычисляется по формуле [19]

$$\overline{Nu} = 0.13 \sqrt[3]{Re Gr^{0.1}} \cdot K_L, \quad (5.27)$$

где K_L — поправочный коэффициент на длину трубы, значения которого в зависимости от отношения длины трубы l к внутреннему диаметру d приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

l/d	1	2	5	10	15	20	30	50
K_L	1,9	1,7	1,44	1,28	1,17	1,08	1,05	1,0

При вихревом режиме движения теплоносителя коэффициент теплопередачи и эффективность теплообмена мало зависят от граничных условий на поверхности стенок канала или трубы. В то же время на теплообмен существенно влияют начальная турбулизация потока и форма входной кромки канала. Эти условия определяют длину начального участка тепловой стабилизации l_H . В случае вынужденной конвекции в трубе диаметром d длина начального участка $l_H = (15...30)d$. Значение критерия Нуссельта на стабилизированном участке в неограниченной прямой трубе

$$Nu_{\infty} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.43} (Pr_f / Pr_w)^{0.25} \quad (5.28)$$

В результате преобразования (5.28) получено [18, 19] справедливое для воды и воздуха соотношение для расчета среднего значения конвективного коэффициента теплопередачи в изогнутой и ограниченной трубе:

$$a_{\infty} = Zv^{0.8}K'_L(1 + 1.8d/R)/d^{0.2}, \quad (5.29)$$

где Z — параметр, учитывающий физические свойства теплоносителя;

K'_L — коэффициент, учитывающий ограничение длины трубы; R — радиус изгиба трубы. Значения параметра Z для воды и воздуха приведены в табл. 5.5, значения поправочного коэффициента — в табл. 5.6.

Таблица 5.5

t_{fc}	-50	-20	0	20	50	100
Z (воздух)	4,3	3,92	3,74	3,56	3,4	3,1
Z (вода)	—	—	1430	1,880	2500	3190

Таблица 5.6

Re	К 'L при разных отношениях l/d						
	1	2	5	10	15	30	50
$1 \cdot 10^4$	1,65	1,5	1,34	1,23	1,17	1,07	1,0
$2 \cdot 10^4$	1,51	1,4	1,27	1,18	1,13	1,05	1,00
$6 \cdot 10^4$	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,04	1,00
$1 \cdot 10^5$	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,03	1,00
$1 \cdot 10^6$	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,02	1,00

На участке нестабилизированного движения теплоносителя в трубе $x \leq l_H = 20 d$ при вихревом режиме значение числа Нуссельта на расстоянии x определяется выражением

$$Nu = (l_H/x)^{1/6}(Nu_{\infty}) \quad (5.30)$$

среднее значение критерия на участке длиной x — выражением

$$\overline{Nu} = 1.2(l_H/x)^{1/6}(Nu_{\infty}). \quad (5.31)$$

Теплофизические параметры теплоносителя, через которые вычисляются критерии, входящие в формулы (5.17) — (5.21), (5.27), (5.28), бе-

рут из таблиц для средней температуры теплоносителя $t_j = 0,5 (t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}})$, где $t_{\text{вх}}, t_{\text{вых}}$ — температуры теплоносителя на входе и выходе канала или трубы.

5.1.4. Передача тепла излучением

Процесс теплообмена излучением основан на способности твердых, жидких и газообразных тел излучать и поглощать тепловую энергию в виде электромагнитных волн инфракрасного диапазона.

Для двух тел, участвующих во взаимном теплообмене излучением (или для тела, помещенного в газовую среду), результирующий тепловой поток, направленный от изотермической поверхности S_1 первого тела с температурой t_1 ко второму телу (или газовой среде) с температурой t_2 определяется соотношением, полученным на основании закона Стефана—Больцмана [18]:

$$P_{\text{л}} = C_0 e_{\text{пр}} \varphi_{12} S_1 \left[\left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273}{100} \right)^4 \right]$$

где $C_0 = 5,670 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела; ε — приведенная степень черноты поверхностей тел, участвующих в теплообмене; φ_{12} — коэффициент взаимной облученности тел.

При теплообмене неограниченных плоскопараллельных пластин, поверхности которых характеризуются степенями черноты ε_1 и ε_2 , приведенная степень черноты

$$e_{\text{пр}} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} \quad (5.33)$$

Для теплообмена в замкнутом пространстве

$$e_{\text{пр}} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + (1/\varepsilon_2 - 1)S_1/S_2} \quad (5.34)$$

где S_1, S_2 — площади поверхностей первого и второго тел.

Значения степени черноты некоторых материалов приведены в табл. П.4.

Коэффициент φ_{12} показывает, какая часть теплового потока, испускаемая нагретым телом, поглощается холодным. Как правило, в расчетах тепловых режимов РЭС полагают $\varphi_{12} = 1$.

Для практических расчетов выражение (5.32) преобразуется к виду

$$R_{л} = \alpha_{л} S_1 (t_1 - t_2) \quad (5.35)$$

Здесь $\alpha_{л} = \varepsilon_{лн} \varphi_{12} f(t_1, t_2)$ — коэффициент теплопередачи излучением, где

$$f(t_1, t_2) = 5.673 \frac{\left(\frac{t_1 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273}{100}\right)^4}{t_1 - t_2} \quad (5.36)$$

5.1.5. Определение конвективного и лучевого коэффициентов теплопередачи по номограммам

Моделирование процесса теплообмена между конструкциями РЭС и средой для меняющихся в широких пределах исходных данных позволило найти аппроксимирующие выражения конвективных и лучевых коэффициентов теплопередачи в виде функций конструктивных параметров, по которым построены номограммы для нахождения этих коэффициентов.

Многообразие номограмм определяется различием в подходах к решению задачи расчета теплообмена.

Структура номограммы и схема определения конвективного коэффициента теплопередачи a_k в условиях естественной конвекции в неограниченном пространстве изображена на рис. 5.9.

Для определения a_k необходимо задать начальный перегрев поверхности теплообмена $\Delta t = t_1 - t_2$, где t_1 — температура на поверхности теплообмена; t_2 — температура окружающей среды, вычислить среднее значение температуры окружающей среды $t_{CP} = 0,5 (t_1 + t_2)$ и определяющий размер нагретого тела (конструкции) $L = \sqrt{S/6}$, где S — площадь поверхности теплообмена. Затем соединить прямой точки t_{CP} и Δt , из точки пересечения этой прямой со вспомогательной линией A провести прямую в точку L . На пересечении данной линии со шкалой a_k считывается значение конвективного коэффициента теплопередачи.

Номограмма для определения коэффициента теплопередачи излучением $a_{л}$ приведена на рис. 5.10. Номограмма построена для степени черноты поверхности $\varepsilon_n = 0,8$. Значение коэффициента теплопередачи считывают в точке пересечения шкалы a_k с прямой, соединяющей точ-

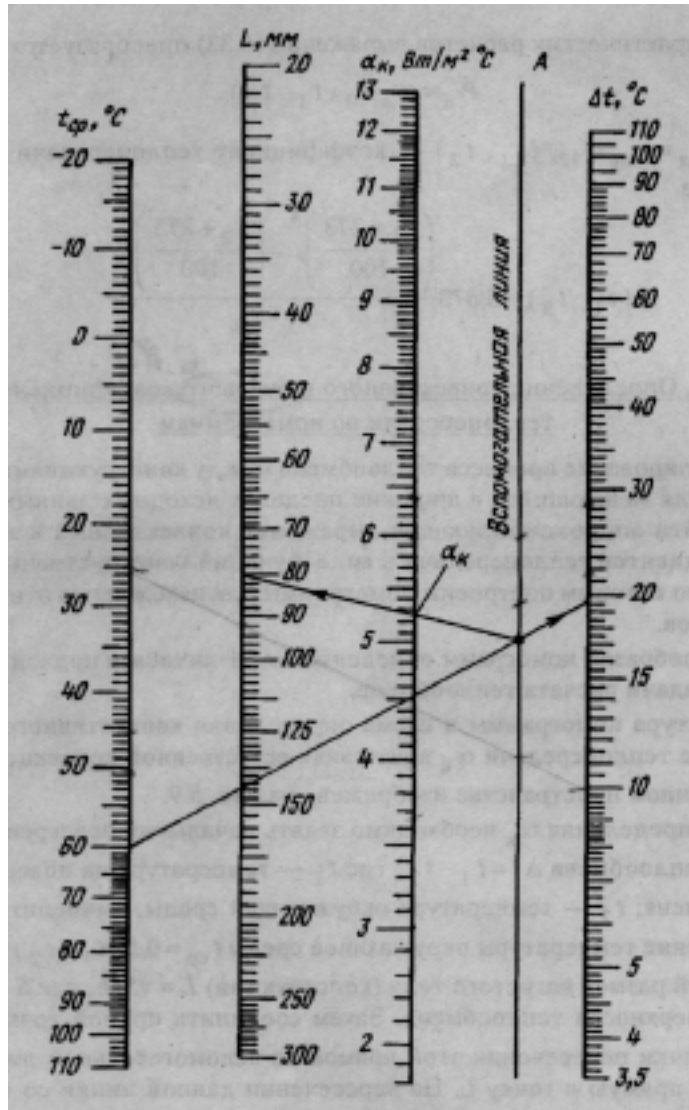


Рис. 5.9. Номограмма для определения конвективного коэффициента теплопередачи

ки $t_2'' - t_2$ на температурной шкале. Пересчет коэффициента теплопередачи, найденного с помощью номограммы, на реальную степень черноты поверхности теплообмена ϵ производится по формуле

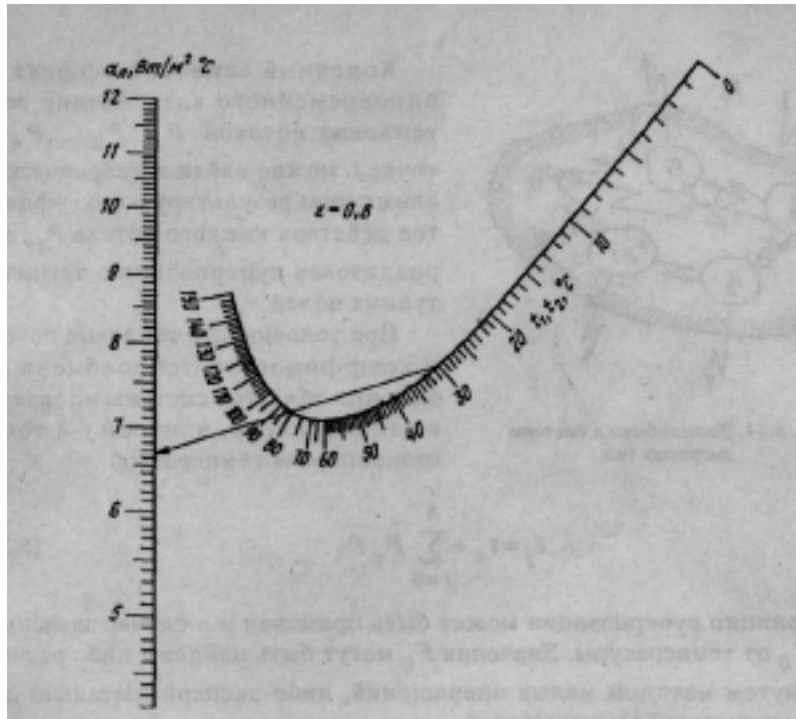


Рис. 5.10. Номограмма для определения коэффициента теплопередачи излучением

$$a_d = a_{дн} \varepsilon / \varepsilon_H$$

где $a_{дн}$ — значение коэффициента теплопередачи, определенного по номограмме.

5.1.6. Принципы суперпозиции температурных полей и местного влияния

Конструкция РЭС представляет собой систему нагретых тел, рассеивающих тепловые потоки P_i и находящихся во взаимном теплообмене друг с другом, с некоторой j -й точкой и окружающей средой (рис. 5.11). Если рассмотреть воздействие каждого теплового потока на точку u обособленно от воздействия других потоков, то становится очевидным, что температура t_j этой точки, каждый раз оказывающейся на некоторой изотермической поверхности, обусловлена тепловым коэффициентом F_{ij} между источником тепла с тепловым потоком P_i и изотермической поверхностью.

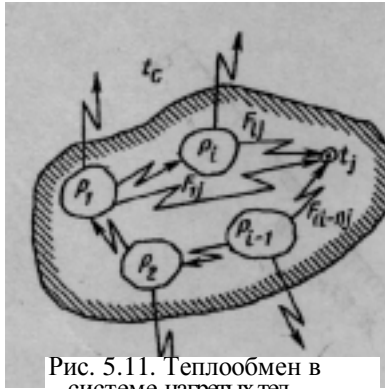


Рис. 5.11. Теплообмен в системе нагретых тел

Конечный тепловой эффект от одновременного воздействия всех тепловых потоков P_1, P_2, \dots, P_n в

Точке j можно найти алгебраическим сложением результирующих эффектов действия каждого потока P_i , т.е.

реализовав суперпозицию температурных полей.

При условии, что тепловые потоки и коэффициенты теплообмена отдельных областей системы не зависят от температуры, в любой j -й точке стационарная температура

$$t_j = t_C + \sum_{i=0}^n F_{ij} P_i \quad (5.37)$$

Принцип суперпозиции может быть применен и в случае зависимости F_{ij} от температуры. Значения F_{ij} могут быть найдены либо расчетным путем методом малых приращений, либо экспериментально для результирующей температуры t_j .

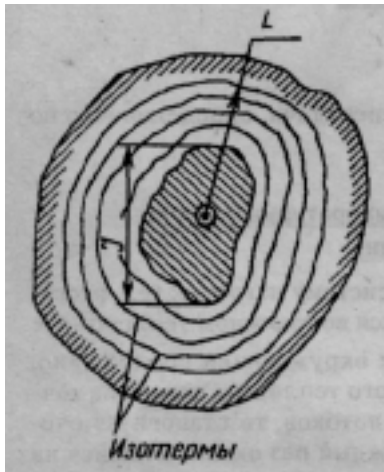


Рис. 5.12. К пояснению принципа местного влияния

При анализе температурных полей нагретых тел часто требуется определить, а каком расстоянии от области, занятой источником тепла, конфигурация этой области практически не влияет на конфигурацию температурного поля в теле. В ряде работ показано [18], что если источник занимает область J (рис. 5.12) и равномерно распределен в этой области, то на расстоянии L от центра области по величине примерно равном наибольшему размеру области) характер температурного поля такой же, как и в случае, если тепловой поток сосредоточен в центре области.

Иными словами, любое местное возмущение температурного поля локально не распространяется на отдельные участки этого поля.

В качестве примера можно привести температурное поле группы радиоэлементов, расположенных на плате узла РЭС и являющихся источниками тепла. Эта группа элементов вызывает такое же повышение температуры в отдельных частях аппарата, как и равномерно распределенный на плате источник той же мощности. Вблизи от радиоэлементов температурное поле в значительной степени зависит от размеров и конфигурации самих элементов.

5.1.7. Электротепловая аналогия

Формулы (5.2), (5.3) и (5.35), устанавливающие зависимость между тепловыми потоками и перегревом, аналогичны формуле закона Ома в интегральной форме для электрических цепей:

$$I = \sigma(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (5.38)$$

Это позволило использовать методы и приемы теории электрических цепей для интерпретации процессов теплообмена.

Из сравнения соотношений для тепловых потоков и электрического тока, протекающего через участок электрической цепи, легко установить следующие аналогии:

электрическое сопротивление R_e — тепловое сопротивление R ;

электрическая проводимость σ_e — тепловая проводимость σ ;

электрическое напряжение U — температурный перегрев Δt ;

электрический потенциал φ — температура t ;

электрический ток I — тепловой поток P .

На основании электротепловой аналогии процесс теплообмена может быть представлен тепловой схемой, элементами которой являются источники и приемники тепловой энергии и тепловые сопротивления (проводимости). Каждому узлу тепловой схемы ставится в соответствие определенная температура t . Переменные величины в тепловой схеме (тепловые потоки и перегревы) подчиняются законам Ома и Кирхгофа для тепловых схем. На основании этих законов тепловые схемы могут быть преобразованы и упрощены.

Как следует из (5.2), (5.3), (5.35) и (5.38), тепловые проводимости (сопротивления) тепловой схемы определяются с помощью соотношений:

при кондуктивной теплопередачи

$$S_T = \frac{IS_{CP}}{l} = a_T S_{CP}; R_T = \frac{1}{a_T S_{CP}}$$

при передаче тепла конвекции

$$\sigma_k = \alpha_k S; Rk = \frac{1}{\alpha_k S}$$

при передаче тепла излучением

$$\sigma_{л} = \alpha_{л} S; \quad R_{л} = \frac{1}{\alpha_{л} S}$$

Таким образом, тепловые проводимости (сопротивления) выражаются через теплофизические параметры материалов (среды) и геометрические (конструктивные) характеристики нагретых тел.

Пример 5.1. Через цилиндрический стержень диаметром d , составленный из двух разнородных материалов с коэффициентами теплопроводности λ_1 и λ_2 (рис. 5.13, а), протекает тепловой поток P . Составить тепловую схему процесса теплопередачи и при известной температуре t_2 правого конца найти температуру t_k в контакте материалов и температуру t_1 .

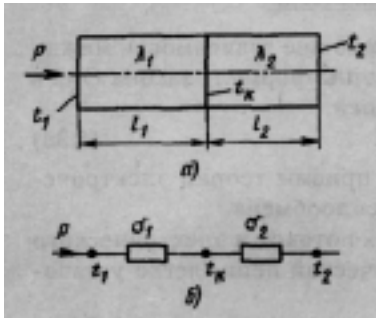


Рис. 5.13. Передача тепла в цилиндрическом стержне: а — конструкция

Тепловая схема представлена на рис. 5.13, поскольку

$$P = \sigma_2(t_k - t_2) = \sigma_1(t_1 - t_k),$$

то

$$t_k = t_2 + P/\sigma_2; \quad t_1 = t_k + P/\sigma_1$$

Для кондуктивной теплопередачи

$$S_1 = \frac{11pd^2}{4l_1} \quad S_2 = \frac{12pd^2}{4l_2}$$

Пример 5.2. Составить тепловую схему, отражающую процесс теплопередачи от транзистора, установленного на радиаторе с площадью теплоотводящей поверхности S_p (рис. 5.14, а), к среде, если на кристалле транзистора выделяется мощность P . Тепловая схема приведена на рис. 5.14, б.

Тепловой поток от кристалла транзистора через внутреннюю проводимость $\sigma_{вн}$ передается на корпус транзистора, через проводимость $\sigma_{кр}$ контакта «корпус транзистора — радиатор» — на радиатор и с радиатора конвективным и лучевым способами — среде. Одновременно часть теплового потока конвек-

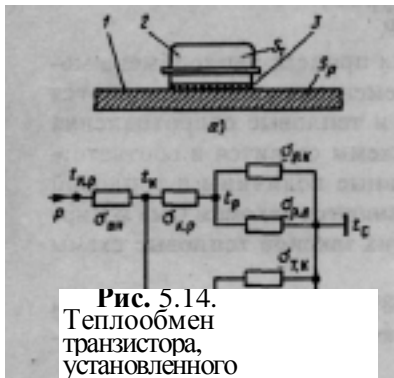


Рис. 5.14. Теплообмен транзистора, установленного на радиаторе: а — схематическое изображение конструкции; б — тепловая схема; 1 — радиатор; 2 — транзистор; 3 — прокладка

цией и излучением стекает в окружающее пространство непосредственно с корпуса транзистора.

5.2. Методы теплового моделирования и расчета тепловых режимов конструкций РЭС

Исследование теплового режима конструкции РЭС состоит в определении температуры в некоторой точке $t_i \bullet = t_j \bullet (\tau, P)$ и температурного перегрева $\Delta t_j = \Delta t_j (\tau, P)$. В установившемся (стационарном) режиме Δt , не зависит от времени τ , а зависимость $\Delta t_j = A t_j \bullet (P)$ называют тепловой характеристикой j ой точки (области) конструкции.

В общем случае исследование тепловых режимов конструкций выполняют в следующем порядке: определяют класс конструкции и составляют ее тепловую модель; реализуют тепловую модель математически и рассчитывают показатели теплового режима; производят оценку точности теплового моделирования.

Класс объединяет конструкции, имеющие общие признаки и одинаковую физическую основу протекания тепловых процессов. При определении класса конструкции учитывают такие признаки, как структура нагретой зоны, способ охлаждения нагретой зоны, способ охлаждения кожуха и др.

Тепловую модель конструкции или класса получают в результате анализа конструкций, выявления их теплофизических свойств и идеализации процессов теплообмена.

5.2.1. Методы теплового моделирования конструкции РЭС

Наиболее часто тепловое моделирование выполняется методами изотермических поверхностей, однородного анизотропного тела и экспериментальными методами.

Метод изотермических поверхностей основан на выделении в конструкции поверхностей с одинаковыми или условно одинаковыми температурами в каждой точке поверхности. Считается, что теплообмен осуществляется между этими поверхностями. В зависимости от конкретной задачи исследования к изотермическим поверхностям конструкций относят поверхность корпуса со среднеповерхностной температурой t_k , поверхность нагретой зоны с температурой t_3 , поверхность отдельной функциональной ячейки с температурой t_{3j} , поверхность отдельного радиоэлемента с температурой t_{3i} и т.д.

Пример построения тепловой модели конструкции блока разъемного типа методом изотермических поверхностей приведен на рис. 5.15.

Как следует из рисунка, среднеповерхностные температуры представляют собой среднеарифметические значения реальных температур в различных точках поверхности, т.е.

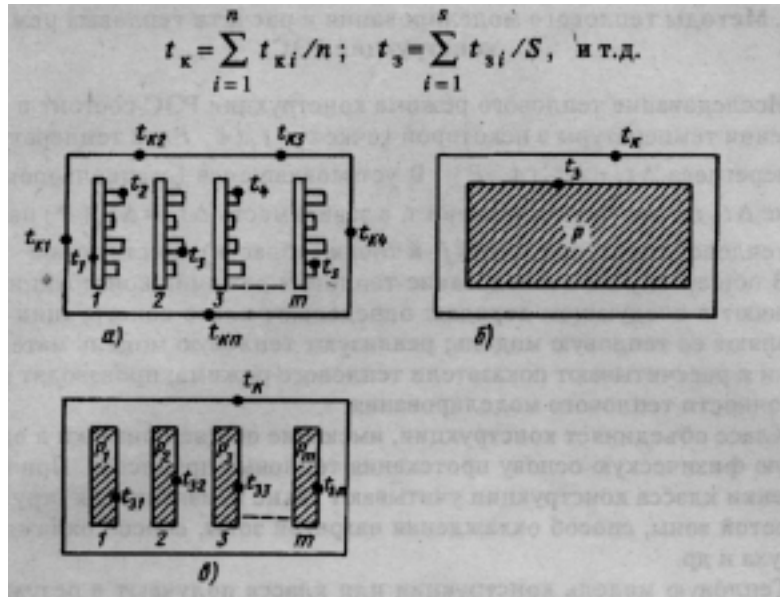


Рис. 5.15. Построение тепловой модели блока методом изотермических поверхностей: *а* — схематическое изображение конструкции; *б* — модель для определения среднеповерхностной температуры нагретой зоны; *в* — модель для определения среднеповерхностных температур функциональных ячеек

Таким образом, метод изотермических поверхностей позволяет находить лишь среднеповерхностные температуры. Детализация тепловой модели дает возможность довести решение до определения температуры отдельного радиоэлемента, однако при этом резко возрастает сложность задачи.

Метод однородного анизотропного тела состоит в представлении реальной конструкции или ее части однородным анизотропным телом в виде прямоугольного параллелепипеда с внутренними источниками тепла, для которого находят эквивалентные коэффициенты теплопроводности $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ по направлениям осей координат, перпендикулярных граням параллелепипеда. При известных коэффициентах теплопроводности и геометрических размерах l_x, l_y, l_z однородного анизотропного тела можно определить тепловое сопротивление R_0

между центром тела и его поверхностью. Формула для расчета R_0 , полученная в результате решения дифференциального уравнения теплопроводности, характеризующего температурное поле однородного анизотропного параллелепипеда, записывается в виде

$$R_0 = Clz / (4\lambda z l_x l_y) \quad (5.39)$$

ГДЕ
$$C = f \left(\frac{l_z}{l_x} \sqrt{\frac{l_z}{l_x}}, \frac{l_x}{l_y} \sqrt{\frac{l_z}{l_y}} \right)$$

коэффициент, характеризующий форму однородного анизотропного тела, значение которого обычно представляют графически (рис. 5.16). Графики построены для определенных условий выбора направлений осей координат однородного тела. Такими условиями являются неравенства:

$$l_z = l_x \sqrt{\frac{l_z}{l_x}}, l_z = l_y \sqrt{\frac{l_z}{l_y}}$$

Знание R_0 позволяет найти температуру в центре однородного тела как

$$t_0 = t_s + R_0 P,$$

где t_s — температура на поверхности тела; P — суммарный тепловой поток внутренних источников тепла.

Наиболее важным шагом в построении тепловой модели конструкции РЭС в виде однородного анизотропного тела является выделение в конструкции элементарной тепловой ячейки, которая должна отвечать следующим требованиям:

иметь правильную геометрическую форму (желательно форму прямоугольного параллелепипеда);

обеспечить геометрическую воспроизводимость моделируемой конструкции формальным наращиванием числа ячеек по осям x , y и z ;

допускать представление ячейки совокупностью простейших однородных изотропных тел правильной геометрической формы, для кото-

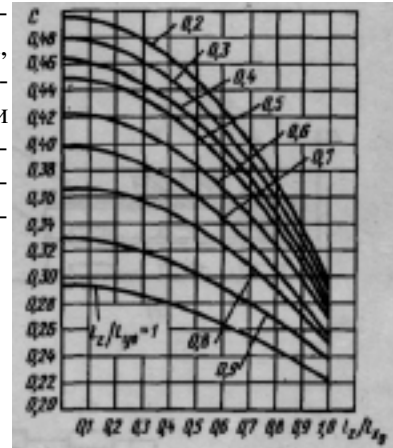


Рис. 5.16. Графики для определения коэффициента формы

рых достаточно просто рассчитываются тепловые проводимости (сопротивления).

Как правило, в элементарную тепловую ячейку включают источник тепла (радиоэлемент), часть несущей конструкции (основания, печатной платы и т.д.) и воздушных прослоек, окружающих источник тепла.

Процедура выбора элементарной тепловой ячейки иллюстрируется на примере фрагмента конструкции нагретой зоны блока (рис. 5.17, а) с горизонтально расположенными платами 2, на которых в правильном порядке размещены корпусированные интегральные микросхемы 1. Проекция элементарной тепловой ячейки на координатную плоскость xOy ограничена пунктирной линией и заштрихована.

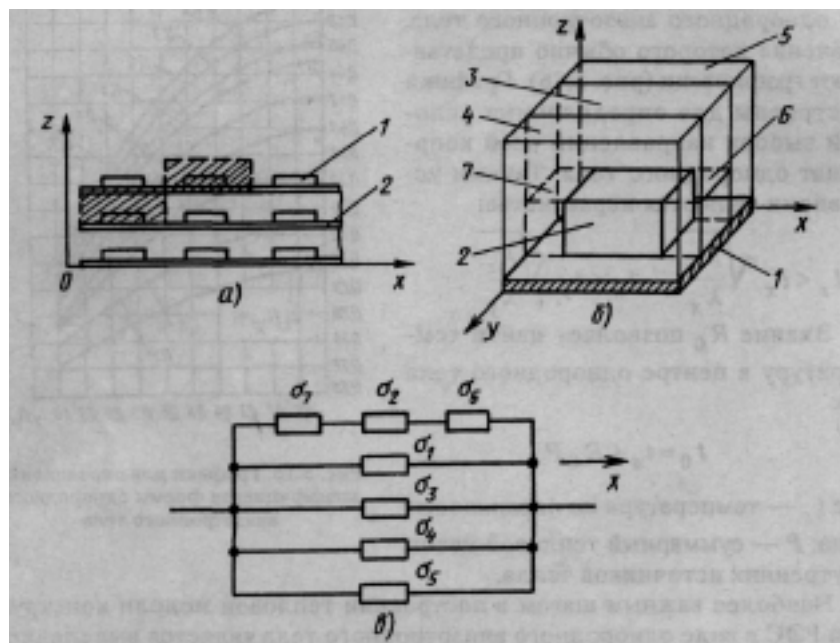


Рис. 5.17. Построение тепловой модели методом однородного анизотропного тела:

а — выделение элементарной тепловой ячейки;

б — представление ее структуры; в — тепловая схема ячейки по направлению x

Объемное изображение элементарной тепловой ячейки в увеличенном масштабе дано на рис. 5.17,б. Здесь же показано разбиение ячейки на простейшие составляющие однородные изотропные тела. Как видно из рисунка, все выделенные тела представляют собой прямоугольные параллелепипеды, для которых при известных коэффициентах тепло-

проводности материала λ , и геометрических размерах тепловая проводимость может быть найдена по формуле

$$\sigma_T = \lambda S/l, \quad (5.40)$$

где S — площадь грани параллелепипеда, перпендикулярной направлению теплового потока; l — длина стороны параллелепипеда, совпадающей с направлением теплового потока.

После выделения элементарной тепловой ячейки и ее разбиения на простейшие однородные изотропные тела на основе электротепловой аналогии составляются тепловые схемы, отражающие процесс переноса тепла в ячейке по направлениям осей координат. На рис. 5.17, в приведена тепловая схема передачи тепла в элементарной тепловой ячейке по направлению x . Индексы тепловых проводимостей на схеме совпадают с номерами простейших однородных тел, на которые разбита элементарная тепловая ячейка (см. рис. 5.17,б). Тепловые схемы отражающие передачу тепла в ячейке по направлениям y и z , построены аналогично и приведены на рис. 5.18.

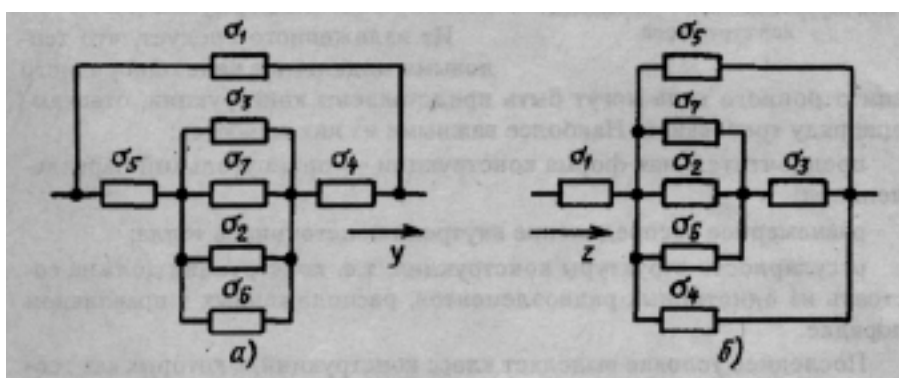


Рис. 5.18. Тепловые схемы элементарной тепловой ячейки по направлениям y (а) и z (б)

Расчет тепловых проводимостей $\sigma_1, \dots, \sigma_7$ и преобразование тепловых схем элементарной тепловой ячейки к простейшему виду позволяет найти тепловые проводимости ячейки $\sigma_{yx}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}$, по соответствующим направлениям осей координат.

Завершающим этапом построения тепловой модели является расчет тепловых проводимостей однородного анизотропного тела по направлениям x, y, z и эквивалентных коэффициентов теплопроводности $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$. Если однородный анизотропный параллелепипед имеет

размеры l_x , l_y , l_z , в пределах которых укладывается соответственно k , m и n элементарных тепловых ячеек (рис. 5.19), то тепловые проводимости параллелепипеда могут быть найдены по формулам:

$$\sigma_x = \sigma_{yx} mn / k, \quad \sigma_y = \sigma_{xy} kn / m, \quad \sigma_z = \sigma_{az} km / n.$$

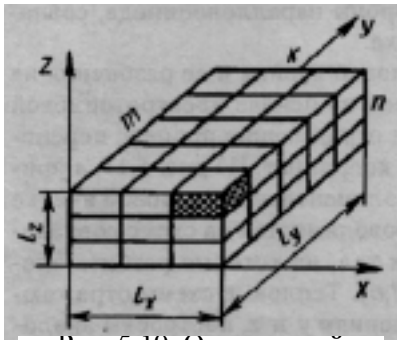


Рис. 5.19. Однородный анизотропный параллелепипед с

Эквивалентные коэффициенты теплопроводности легко найти с помощью (5.40) через значения σ_x , σ_y , σ_z геометрические размеры параллелепипеда:

$$I_x = \frac{\sigma_x l_x}{l_y l_z}; \quad I_y = \frac{\sigma_y l_y}{l_x l_z}; \quad I_z = \frac{\sigma_z l_z}{l_x l_y};$$

После того как коэффициенты теплопроводности однородного анизотропного тела определены, можно воспользоваться формулой (5.39).

Из изложенного следует, что тепловыми моделями в виде однородного анизотропного тела могут быть представлены конструкции, отвечающие ряду требований. Наиболее важными из них являются:

предпочтительная форма конструкции — прямоугольный параллелепипед;

равномерное распределение внутренних источников тепла;

регулярность структуры конструкции, т.е. конструкция должна состоять из однотипных радиоэлементов, расположенных в правильном порядке.

Последнее условие выделяет класс конструкций, в которых как геометрические, так и теплофизические свойства периодически повторяются (системы с «дальним порядком»). В таких конструкциях четко обозначены границы элементарной тепловой ячейки, что позволяет без особых затруднений определить параметры тепловой модели. Лучше других данному требованию удовлетворяют конструкции цифровых РЭС разъемного и книжного типов. Тем не менее даже в этих конструкциях свойство дальнего порядка может частично нарушаться, поскольку не все радиоэлементы имеют одинаковые геометрические формы, не всегда соблюдается периодичность их расположения. В таких случаях элементарная тепловая ячейка объединяет группу элементов (рис. 5.20), повторяющихся по направлениям координат, а конструкцию относят к системе с «ближним порядком».

В задачах анализа тепловых режимов конструкций РЭС моделью однородного анизотропного тела обычно представляют нагретую зону конструкции. Определение по формуле (5.39) теплового сопротивления R_0 между центром и поверхностью нагретой зоны позволяет найти температуру t_0 центра нагретой зоны как самой «горячей» точки конструкции. Знание этой температуры уже достаточно для объективной оценки теплового режима. Однако возможности метода существенно расширяются, если воспользоваться приближенной формулой, позволяющей определить тепловое сопротивление между любой внутренней точкой однородного анизотропного параллелепипеда и его поверхностью:

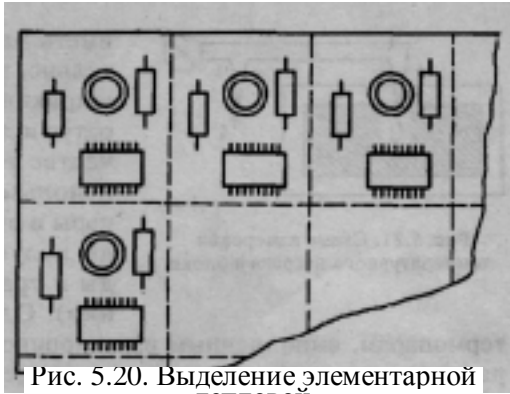


Рис. 5.20. Выделение элементарной тепловой ячейки в конструкции, приводимой к системе с «ближним порядком»

$$R_{0j} = R_0 (1 - l^2 / L^2_j), \quad (5.41)$$

где l_j — расстояние между центром параллелепипеда и точкой j ; L_j — расстояние между центром параллелепипеда и его поверхностью по прямой, проходящей через точку j .

Если с j -и точкой нагретой зоны связано положение некоторого радиоэлемента, то формула (5.41) позволяет найти его температуру как

$$t_{0j} = t_s + R_{0j} P$$

Экспериментальный метод теплового моделирования заключается в создании макета конструкции РЭС, воспроизводящего процесс теплообмена реальной конструкции. Степень приближения макета к конструкции зависит от конкретной задачи исследования. Так, например, для моделирования температурного поля кожуха блока нет необходимости в воссоздании на макете структуры нагретой зоны.

На макете можно изучить динамику тепловых процессов, а также снять распределение температур в пределах конструкции в стационарном режиме.

Измерение температур производится с помощью температурных датчиков, установленных в различных точках макета. Датчики должны

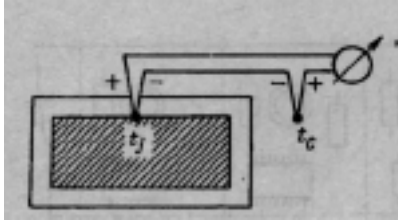


Рис. 5.21. Схема измерения температурного нагрева в блоке

иметь малую теплоемкость и, следовательно, массу и объем, по возможности широкий диапазон измеряемых температур и линейную характеристику. В качестве температурных датчиков могут использовать терморезисторы, термопары и обратно смещенные р-п-переходы полупроводниковых приборов (диоды и транзисторы в диодном включении). Однако предпочтение отдается термопарам, выполненным из микропровода. Схема измерения температуры с помощью термопар приведена на рис. 5.21. Применяется встречное включение двух термопар, что дает возможность произвести измерение перегрева $\Delta t_j = t_j - t_c$.

5.2.2. Методы расчета тепловых режимов конструкций РЭС*

Для конструкций РЭС наиболее жестким является стационарный тепловой режим, когда температуры и перегревы в конструкции достигают максимальных значений. Поэтому одной из основных задач расчета показателей теплового режима является определение температур в некоторых критических точках конструкции или построение тепловой характеристики.

Как уже отмечалось, под тепловой характеристикой конструкций РЭС в стационарном режиме понимают зависимость температуры или перегрева j -й точки (области конструкции) от теплового потока при заданной температуре окружающей среды t_c :

$$t_j = t_c + f(P), \Delta t_j = t_j - t_c = f(P).$$

При передаче тепла теплопроводностью, конвекцией и излучением

$$\Delta t_j = P / \sigma_{\Sigma j}$$

где $\sigma_{\Sigma j} = \sigma_T + \sigma_K + \sigma_L$ — эквивалентная тепловая проводимость между j -й точкой конструкции и окружающей средой.

Ввиду того что составляющие σ_{Σ} зависят как от температуры t_j , так и от температуры окружающей среды t_c , задача расчета t_j и Δt в общем случае является неопределенной. Для исключения неопределенности используются специальные приемы, положенные в основу трех методов расчета показателей теплового режима: метода последовательных приближений, метода тепловой характеристики и коэффициента метода.

Метод последовательных приближений представляет собой итеративный процесс установления соответствия с некоторой наперед заданной точностью между температурой t_j или перегревом Δt , эквивалентной тепловой проводимостью σ_t и тепловым потоком P .

Начальное значение перегрева $\Delta t_j'$ (температуры t_j') j -й точки или области конструкции задают произвольно, после чего находят σ'_Σ и расчетное значение перегрева $\Delta t_{jp}'$ (температуры t_{jp}'), в первом приближении:

$$\Delta t_{jp}' = P / \sigma'_\Sigma ; t_{jp}' = t_{oc} + P / \sigma'_\Sigma .$$

При выполнении неравенства $|\Delta t_j' - \Delta t_{jp}'| \leq \delta$, где $\delta = (1 \dots 2)^\circ \text{C}$, за истинное значение перегрева принимают $\Delta t_j'$ или $\Delta t_{jp}'$. Если неравенство не выполняется, то расчет повторяется во втором приближении при $\Delta t_j'' = \Delta t_{jp}'$.

Более подробно порядок решения задачи можно представить следующим образом:

задают значение перегрева Δt_j в первом приближении;

для среднего значения температуры окружающей среды $t_{cp}' = 0,5[t_c + (t_c + \Delta t_j)]$ с помощью критериальных уравнений или по номограмме определяют конвективный коэффициент теплопередачи α'_k ;

для температуры $t_j' = t_c + \Delta t_j$ находят коэффициент теплопередачи излучением $\alpha'_л$;

определяют коэффициент теплопередачи теплопроводностью α_t и эквивалентную тепловую проводимость $\sigma'_\Sigma = \alpha_t S_{cp} + \alpha'_k S + \alpha'_л S$, где S — площадь поверхности теплообмена;

находят расчетное значение перегрева для заданного теплового потока $\Delta t_{jp}' = P / \sigma'_\Sigma$;

проверяют условие $|\Delta t_j' - \Delta t_{jp}'| \leq \delta$, где δ — допустимое отклонение расчетного значения перегрева от принятого в первом приближении; если неравенство не выполняется, то повторяют расчет во втором приближении при $\Delta t_j'' = \Delta t_{jp}'$.

Количество приближений зависит от величины δ и того, насколько удачно задано значение перегрева в первом приближении.

Пример 5.3. Определить среднеповерхностную температуру корпуса блока РЭС с геометрическими размерами 50x100x150 мм при тепловом потоке $P = 10$ Вт и температуре окружающей среды $t_c = 60^\circ \text{C}$. Корпус окрашен серой эмалевой краской.

Поверхность корпуса считаем изотермической со среднеповерхностной температурой t_K . Тепло от корпуса к окружающей среде передается конвекцией и излучением. Площадь поверхности корпуса (теплообмена) $S_K = 2(0,05 \cdot 0,1 + 0,05 \cdot 0,2 + 0,1 \cdot 0,15) = 0,06 \text{ м}^2$. Характерный

размер конструкции $L = \sqrt{S_K / 6}$. Задаем перегрев корпуса в первом приближении $\Delta t'_K = 10^\circ \text{С}$. Температура корпуса в первом приближении $t'_K = t_c + \Delta t'_K = 60 + 10 = 70^\circ \text{С}$. Среднее значение температуры окружающей среды $t_{cp} = 0,5(t_c + t'_K) = 0,5(60 + 70) = 65^\circ \text{С}$. Из табл.115 теплофизических параметров сухого воздуха находим: коэффициент теплопроводности $\lambda'_в = 2,93 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{с)}$, коэффициент кинематической вязкости $\nu = 19,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Коэффициент объемного расширения воздуха $\beta' = 1/(t'_{cp} + 273) = 1/(65 + 273) = 2,96 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$; критерий Грасгофа

$$Gr' = b' g \frac{L^3}{\nu^2} (t'_K - t'_c) = 2,96 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \frac{(0,1)^3}{(19,5 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 10 = 76,4 \cdot 10^4$$

критерий Прандтля $Pr' = 0,7$; произведение $Gr' \cdot Pr' = 53,5 \cdot 10^4$.

Из табл. 5.1 определяем, что режим движения воздуха — переходный, коэффициенты теплообмена $C = 0,54$, $л = 0,25$. Критерий Нуссельта $Nu' = C (Gr' \cdot Pr')^л = 0,54(53,5 \cdot 10^4)^{0,25} = 14,6$.

Конвективный коэффициент теплопередачи в первом приближении

$$\alpha'_к = Nu' \lambda'_в / L = 14,6 \cdot 2,93 \cdot 10^{-2} / 0,1 = 4,28 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

По номограмме рис. 5.10 находим $\alpha'_{лн} = 7,2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

Из табл. П.4 определяем степень черноты поверхности корпуса для эмалевых красок $\epsilon_k = 0,92$. Тогда

$$\alpha'_л = \alpha_{лн} \epsilon_k / \epsilon_n = 7,2 \cdot 0,92 / 0,8 = 8,3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Эквивалентная тепловая проводимость между корпусом и средой

$$\alpha'_E = (\alpha'_к + \alpha'_л) S_K = (4,28 + 8,28) \cdot 0,06 = 0,753 \text{ Вт/К}.$$

Расчетное значение перегрева корпуса в первом приближении

$$\Delta t'_{кР} = P / \sigma'_\Sigma = 10 / 0,753 = 13,3^\circ \text{С}.$$

Разность температурных перегревов

$$|\Delta t'_K - \Delta t'_{кР}| = |10 - 13,3| = 3,3^\circ \text{С} > (1 \dots 2)^\circ \text{С}.$$

Следовательно, требуется выполнить расчет во втором приближении.

Перегрев корпуса во втором приближении $\Delta t''_K = \Delta t' = 13,3^\circ \text{С}$.

Температура корпуса $t''_K = 60 + 13,3 = 73,3^\circ \text{С}$. Среднее значение темпе-

ратуры окружающей среды $t''_{\text{ср}} = 0,5 (60 + 73,3) = 66,7 \text{ } ^\circ\text{C}$. Теплофизические параметры воздуха для $t''_{\text{ср}} = 66,7 \text{ } ^\circ\text{C}$: $\lambda''_{\text{в}} = 2,95 \text{ Вт/м} \cdot \text{ } ^\circ\text{C}$; $\nu'' = 19,67 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\beta'' = 2,94 \cdot 10^{-3} \text{ 1/} ^\circ\text{C}$. Критерий $Gr'' = 98,96 \cdot 10^4$, критерий $Pr'' = 0,7$, $Gr'' \cdot Pr'' = 69,28 \cdot 10^4$. Коэффициенты теплообмена $C = 0,54$, $n = 0,25$. Критерий $Nu'' = 0,54(69,28 \cdot 10^4)^{0,25} = 15,6$. Конвективный коэффициент теплопередачи во втором приближении $\alpha''_{\text{к}} = 15,6 \cdot 2,96 \cdot 10^{-2} / 0,1 = 4,59 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)}$; коэффициент теплопередачи излучением $\alpha''_{\text{л}} = 8,18 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)}$, эквивалентная тепловая проводимость $\sigma''_{\Sigma} = (4,59 + 8,18) \cdot 0,06 = 0,766 \text{ Вт/} ^\circ\text{C}$. Расчетное значение перегрева во втором приближении $\Delta t''_{\text{кр}} = 10 / 0,766 = 13,05 \text{ } ^\circ\text{C}$. Расхождение расчетного значения перегрева во втором приближении с заданным составляет $0,25 \text{ } ^\circ\text{C}$. Следовательно, можно принять, что перегрев корпуса блока $\Delta t_{\text{к}} = 13 \text{ } ^\circ\text{C}$, среднеповерхностная температура $t_{\text{к}} = t_{\text{с}} + \Delta t_{\text{к}} = 60 + 13 = 73 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Метод тепловой характеристики состоит в построении по расчётным данным зависимости $\Delta t_j = f(P)$, по которой для любого значения теплового потока P можно найти перегрев и температуру j -й точки или области конструкции.

Для построения тепловой характеристики задают произвольное значение перегрева $\Delta t'_j$, как и в методе последовательных приближений; находят эквивалентную тепловую проводимость между j -й точкой и окружающей средой σ'_{Σ} , затем тепловой поток $P' = \sigma'_{\Sigma} \Delta t'_j$, который способна рассеять конструкция при данных условиях теплообмена. Значения $\Delta t'_j$ и

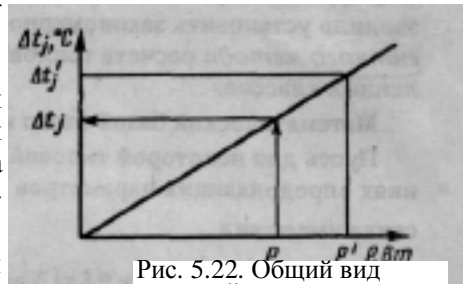


Рис. 5.22. Общий вид тепловой характеристики

P' являются координатами одной точки, лежащей на тепловой характеристике, второй точкой служит начало координат. Таким образом, тепловая характеристика представляет собой прямую, проходящую через начало координат и точку с координатами $\Delta t'_j$ и P' (рис. 5.22). По тепловой характеристике может быть найден перегрев и температура j -й точки или области конструкции при любом заданном значении теплового потока.

Пример 5.4. По условиям примера 5.3 методом тепловой характеристики определить среднеповерхностную температуру корпуса блока.

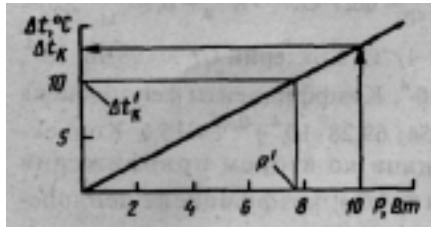


Рис. 5.23. Тепловая характеристика

В примере 5.3 для начального перегрева корпуса $\Delta t_K' = 10^\circ\text{C}$ была найдена эквивалентная тепловая проводимость «корпус — окружающая среда» $\sigma'_\Sigma = 0,753 \text{ Вт}/^\circ\text{C}$. Тепловой поток, который может рассеять поверхность корпуса блока, $P' = 0,753 \cdot 10 = 7,53 \text{ Вт}$.

Тепловая характеристика блока

приведена на рис. 5.23. По характеристике для заданного теплового потока $P = 10 \text{ Вт}$ находим $\Delta t_K = 13,1^\circ\text{C}$, $t_K = 60 + 13,1 = 73,1^\circ\text{C}$.

Исследования показывают, что тепловые режимы РЭС характеризуются достаточно высокой стабильностью и зависят от ряда факторов, относящихся к самой конструкции (геометрических размеров, коэффициента заполнения, структуры нагретой зоны, значения теплового потока) и к условиям эксплуатации (температуры и давления окружающей среды).

Изучение влияния на показатели теплового режима определяющих факторов с помощью физических и теоретических тепловых моделей конструкции (при изменении этих факторов в широких пределах) позволило установить закономерности, положенные в основу коэффициента метода расчета тепловых режимов конструкций РЭС определенных классов.

Математической базой этого метода служат следующие выкладки.

Пусть для некоторой типовой конструкции при номинальных значениях определяющих параметров $x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}$ тепловая характеристика имеет вид

$$t_0 = t_0(x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}).$$

При бесконечно малых изменениях каждого параметра показатель теплового режима получит приращение или в конечных приращениях

$$\Delta t_0 = \sum_{i=1}^n A_i \Delta x_{0i} = \sum_{i=1}^n \Delta t_{0i}$$

или в конечных приращениях

где A_i — коэффициент влияния параметров x_{0i} на показатель теплового режима; Δt_{0i} — приращение показателя теплового режима, обусловленное изменением параметра x_{0i}

Новое значение показателя теплового режима можно представить в

$$t = t_0 + \Delta t_0 = t_0 \left(1 + \sum_{i=1}^n \Delta t_{0i} / t_0 \right)$$

При условии, что $\Delta t_{0i} / t_0 \ll 1$

$$t = t_0 \prod_{i=1}^n (1 + \Delta t_{0i} / t_0) = t_0 \prod_{i=1}^n (t_0 + \Delta t_{0i}) / t_0$$

Ввиду того что $t_0 + \Delta t_{0i} = t_i$ — показатель теплового режима при изменении параметра x_{0i} , а отношение $t_i / t_0 = K_i$ — парциальный коэффициент показателя,

$$t = t_0 \prod_{i=1}^n K_i$$

Так как одним из основных показателей теплового режима является температурный перегрев, используемое в коэффициентном методе расчетное соотношение записывается в виде

$$\Delta t = \Delta t_0 \prod_{i=1}^n K_i$$

Начальное значение перегрева Δt_0 определяют по тепловой характеристике для типовой конструкции. Тепловая характеристика строится в координатах Δt , поверхностная плотность теплового потока $P_s = P / S$, где S — площадь поверхности теплообмена.

Значения коэффициентов K_i обычно даются в виде графиков зависимостей от того или иного определяющего параметра.

На рис. 5.24 приведены графики для определения коэффициентов площади поверхности теплообмена конструкции $K_s(a)$, степени черно-

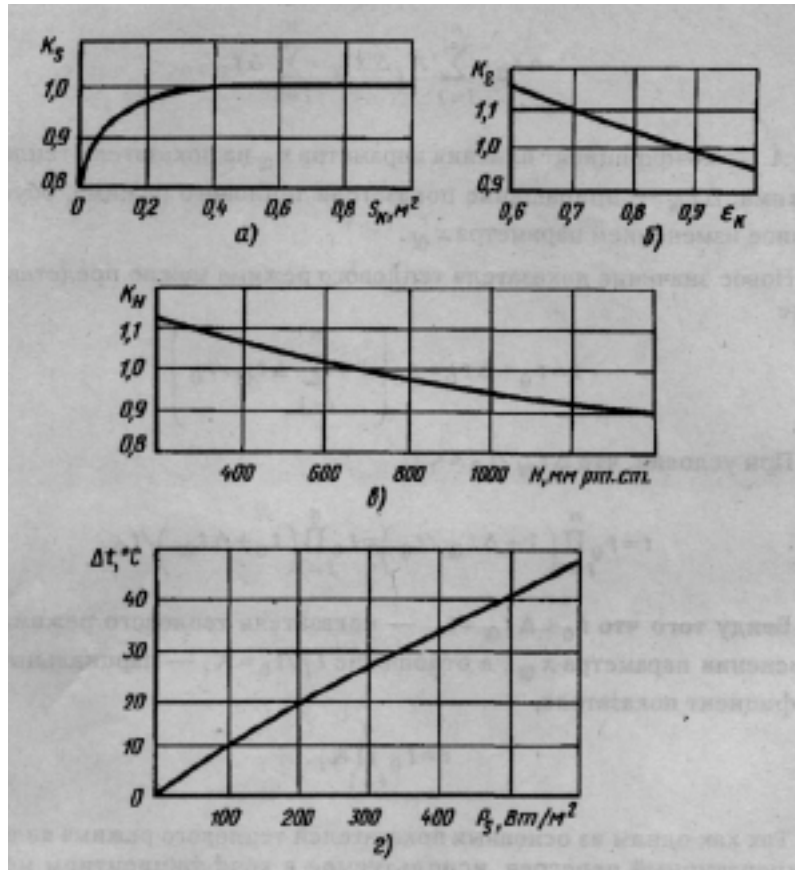


Рис. 5.24. Графики для определения коэффициентов (а, б, в) и тепловая характеристика типовой конструкции (г)

ты поверхности K_e (б), давления окружающей среды K_n (в) и тепловая характеристика типовой конструкции.

При использовании коэффициентного метода следует иметь в виду, что область его применения ограничивается тем классом конструкций, для которых определены коэффициенты.

Пример 5.5. Определить температуру корпуса блока РЭС, имеющего размеры $0,176 \times 0,095 \times 0,072$ м, при тепловом потоке $P = 16$ Вт, давлении окружающей среды $H = 760$ мм рт. ст. и температуре окружающей среды $t_c = 20$ °С. Корпус окрашен эмалевой краской $\epsilon_k = 0,92$.

Площадь поверхности корпуса

$$S_k = 2(0,176 \cdot 0,095 + 0,176 \cdot 0,072 + 0,095 \cdot 0,072) = 0,0724 \text{ м}^2.$$

Плотность теплового потока

$$P_S = P/S_K = 16/0,0724 = 221 \text{ Вт/м}^2.$$

По тепловой характеристике рис. 5.24, ε находим $\Delta t_0 = 21,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Из графиков (рис. 5.24, a , b , ε) определяем $K_S = 0,93$, $K_\varepsilon = 1,0$, $K_H = 1,0$. Перегрев поверхности корпуса

$$\Delta t_K = \Delta t_0 K_S K_\varepsilon K_H = 21,9 \cdot 0,93 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 20,4 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Среднеповерхностная температура корпуса

$$t_K = t_c + \Delta t_K = 20 + 20,4 = 40,4 \text{ }^\circ\text{C}.$$

5.3. Системы охлаждения конструкций РЭС

5.3.1. Классификация и эффективность систем охлаждения

Системой охлаждения называется совокупность устройств и конструктивных элементов, используемых для уменьшения локальных и общих перегревов.

Системы охлаждения принято классифицировать по способу передачи тепла, виду теплоносителя и характеру контакта теплоносителя и источника тепла.

В зависимости от способа передачи тепла и вида теплоносителя системы охлаждения подразделяются на кондуктивные, воздушные, жидкостные, испарительные, комбинированные.

В зависимости от характера контакта теплоносителя и источника тепла различают системы охлаждения прямого и косвенного действия.

Кроме того, все системы охлаждения принято делить на системы общего и локального назначения, с замкнутым (теплоноситель циркулирует в системе охлаждения) и разомкнутым (теплоноситель выбрасывается из системы охлаждения) циклами.

Воздушные системы охлаждения, в свою очередь, подразделяются на системы естественного воздушного охлаждения, системы охлаждения с естественной вентиляцией и системы принудительного воздушного охлаждения.

Жидкостные и испарительные системы охлаждения также делятся на системы естественного жидкостного (испарительного) охлаждения и системы принудительного жидкостного (испарительного) охлаждения.

Особый класс представляют собой системы охлаждения, основанные на использовании эффекта Пельтье.

Эффективность систем охлаждения может быть оценена поверхностной плотностью теплового потока, уносимого теплоносителем из РЭС.

Для различных систем охлаждения плотность теплового потока характеризуется величинами, представленными в табл. 5.7.

Таблица 5.7

Вид систем охлаждения	Плотность теплового потока P_s , Вт/см ²
Естественное воздушное охлаждение	0,2
Принудительное воздушное охлаждение	1,0
Жидкостные системы охлаждения	20
Испарительные	200

5.3.2. Выбор способа охлаждения на ранних стадиях разработки

Ввиду того что способ (система) охлаждения в значительной мере определяет структуру конструкции РЭС, уже на ранних стадиях разработки важно правильно выбрать способ охлаждения. Выбранный способ охлаждения должен обеспечить нормальный тепловой режим конструкции РЭС.

Если в выборе способа охлаждения будет допущена ошибка, то труд большого коллектива разработчиков окажется напрасным, а сроки разработки конструкции и ее стоимость существенно возрастут. Поскольку на ранних стадиях разработчики располагают минимальной информацией о конструкции, то становится очевидной ответственность и одновременно сложность задачи выбора системы охлаждения.

Начальное представление о способе охлаждения можно составить по данным табл. 5.7. Однако при решении практических задач выбор системы охлаждения производится по графикам рис. 5.25, которые ограничивают области целесообразности применения того или иного способа охлаждения. Эти области построены по результатам обработки статистических данных о показателях тепловых режимов реальных конструкций РЭС, расчетов показателей тепловых режимов по тепловым моделям и экспериментальных данных, полученных на макетах.

Исходными данными для выбора системы охлаждения служат:

тепловой поток P , рассеиваемый конструкцией;

диапазоны возможного изменения температуры окружающей среды

$t_{c\min} \dots t_{c\max}$

пределы изменения давления окружающей среды $H_{max} \dots H_{min}$;

допустимые рабочие температуры элементов t_{oi} ;

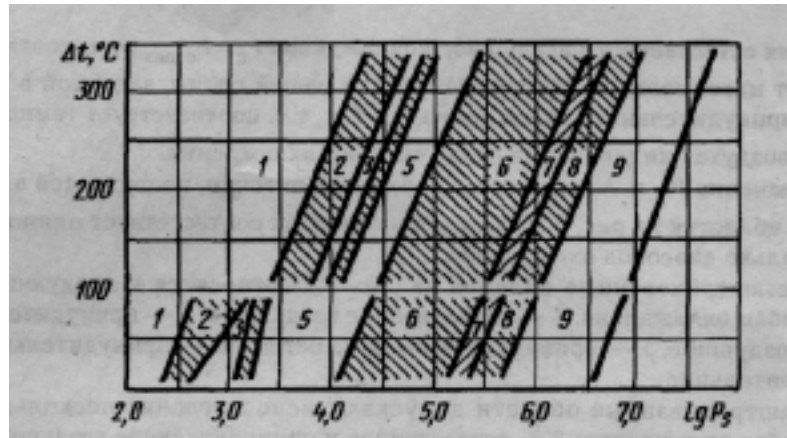


Рис. 5.25. Диаграмма выбора системы охлаждения

геометрические размеры корпуса конструкции L_X, L_Y, L_Z ;

коэффициент заполнения объема конструкции k_3 ;

время непрерывной работы конструкции τ .

Перечисленные исходные данные, за исключением коэффициента заполнения конструкции, обычно указываются в техническом задании на разработку и известны. Коэффициент заполнения может быть выбран на основе опыта конструирования подобных РЭС.

Поскольку графики рис. 5.25 справедливы лишь для стационарного режима, то необходимо знание времени непрерывной работы для определения режима.

Пределы изменения давления окружающей среды задают условия, при которых тепловой режим является наиболее тяжелым.

Основным показателем, определяющим области целесообразного применения способа охлаждения на рис. 5.25, служит плотность теплового потока

$$P_s = PK_H / S_K$$

где K_H — коэффициент, учитывающий давление окружающей среды; $S_K = 2[L_X L_Y + (L_X + L_Y)L_Z K_3]$ — площадь поверхности теплообмена.

Вторым показателем является допустимый перегрев в конструкции

$$\Delta t_{\text{доп}} = t_{\text{э min}} - t_c$$

где $t_{\text{э min}}$ — допустимая рабочая температура наименее теплостойкого радиоэлемента; t_c — температура окружающей среды.

Для естественного воздушного охлаждения $t_c = t_{c \max}$, т.е. соответствует максимальной температуре окружающей среды, заданной в ТЗ. Для принудительного охлаждения $t_c = t_{вх}$, т.е. соответствует температуре воздуха (жидкости) на входе системы охлаждения.

Значения P_s и Δt являются координатами точки, попадающей в одну из областей на рис. 5.25, каждой из которых соответствует один или несколько способов охлаждения.

Незаштрихованные области на рис. 5.25 относятся к следующим способам охлаждения: 1 — естественное воздушное, 3 — принудительное воздушное, 5 — принудительное жидкостное, 9 — принудительное испарительное.

Заштрихованные области допускают использование нескольких способов охлаждения: 2 — естественное и принудительное воздушное, 4 — принудительное воздушное и жидкостное, 6 — принудительное жидкостное и естественное испарительное, 7 — принудительное жидкостное, принудительное и естественное испарительное, 8 — естественное и принудительное испарительное.

Графики на рис. 5.25, соответствующие $\Delta t > 100^\circ\text{C}$, используются для выбора способа охлаждения больших элементов (трансформаторов, дросселей, транзисторов на радиаторах и т.п.), поскольку допустимые температуры их поверхностей относительно высоки. Нижняя часть диаграммы применяется для выбора способа охлаждения блоков и устройств РЭС.

Если показатели P_s и $\Delta t_{\text{доп}}$ для конкретной РЭА (ЭДЭА) попадают в незаштрихованные области рис. 5.25, то способ охлаждения определяется однозначно.

Для заштрихованных областей, где возможно использование двух или трех различных способов охлаждения, задача выбора того или иного способа усложняется. Чтобы найти правильное решение, необходимо воспользоваться вероятностными кривыми, которые связывают показатели P_s , $\Delta t_{\text{доп}}$ и вероятности обеспечения заданного теплового режима при различных условиях теплообмена. Для области 2 (воздушное охлаждение) вспомогательные вероятностные графики приведены в [61].

Если геометрические размеры конструкции не заданы, то площадь поверхности теплообмена можно найти приближенно, используя сведения об элементной базе конструкции и коэффициенты дезинтеграции массы или объема. Задача сводится к ориентировочному определению объема конструкции, через который вычисляется площадь поверхности. Один из возможных путей решения задачи состоит в следующем: через массу радиоэлементов $m_{\text{эл}}$ и коэффициент дезинтеграции

массы находят массу конструкции $m_k = q_m \cdot m_{эл}$ затем определяют объем конструкции $V_k = m_k / m_0$, где m_0 — плотность конструкции, и площадь поверхности корпуса $S_k = 6(V_k)^{2/3}$. Если известны данные о суммарном установочном объеме радиоэлементов $V_{эл}$, то объем конструкции $V_k = q_v V_{эл}$, где q_v — коэффициент дезинтеграции объема.

5.4. Особенности конструкций РЭС с кондуктивными системами охлаждения

Кондуктивные системы охлаждения основаны на контактном способе передачи тепла за счет теплопроводности элементов конструкции.

Структурная схема цепи теплопередачи в кондуктивной системе охлаждения приведена на рис. 5.26. Тепло, выделяемое источником, через неразъемный тепловой контакт передается на теплоотвод (тепловую шину), с которой через тепловой разъем поступает на тепловой сток.

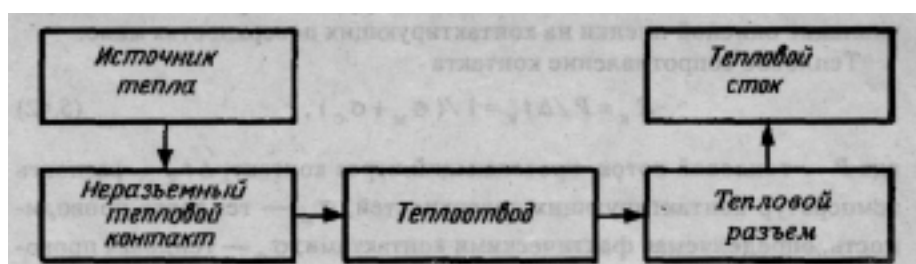


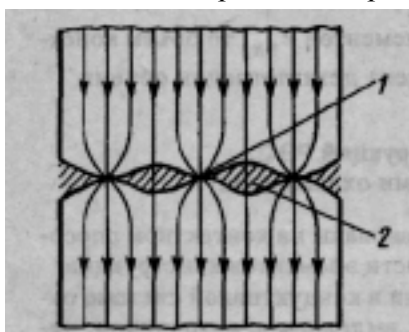
Рис. 5.26. Структура кондуктивной цепи теплопередачи

В идеальной кондуктивной системе теплоемкость стока должна быть бесконечно большой. Поскольку такие теплостоки не реализуемы практически, в реальных конструкциях РЭС кондуктивные цепи теплопередачи, как правило, заканчиваются теплообменниками, отдающими тепло окружающей среде или другому теплоносителю.

Высокая эффективность кондуктивных систем охлаждения достигается при малом тепловом сопротивлении цепи теплопередачи между источником тепла и окружающей средой. Поэтому при разработке конструкций РЭС с кондуктивными системами охлаждения прежде всего необходимо обратить внимание на тепловые контакты, конструкцию тепловой шины и теплообмен с окружающей средой или иным теплоносителем в теплообменнике.

5.4.1. Моделирование тепловых контактов в кондуктивных цепях

Структура теплового контакта изображена на рис. 5.27. В контакте тепло от нагретой поверхности к холодной передается теплопроводностью фактического контакта 1 и среды 2, заполняющей микронеровности поверхностей.



Эффективность теплопередачи излучением ввиду малой разности температур между нагретой и холодной поверхностями низка. Поэтому теплопередача излучением через среду не учитывается.

Предполагается, что пятна фактического контакта контактирующих поверхностей распределены равномерно по всей поверхности контакта. Все пятна имеют форму круга с одним и тем же радиусом, не изменяющимся при изменении нагрузки. Термическое сопротивление окисной пленки на контактирующих поверхностях мало.

Рис. 5.27. Контакт плоских поверхностей:

Тепловое сопротивление контакта

$$R_k = P/\Delta t_k = 1/(\sigma_m + \sigma_c), \quad (5.42)$$

где P — тепловой поток, протекающий через контакт; Δt_k — разность температур контактирующих поверхностей; σ_m — тепловая проводимость, определяемая фактическими контактами; σ_c — тепловая проводимость среды.

Удельное (отнесенное к площади) сопротивление фактического контакта

$$R_{M.уд} = \frac{j}{2.12I_M h} \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ К} / \text{Вт} \quad (5.43)$$

где ϕ — коэффициент стягивания теплового потока к пятнам фактического контакта; $\lambda_m = 2\lambda_1\lambda_2/(\lambda_1 + \lambda_2)$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности фактического контакта (λ_1, λ_2 — коэффициенты теплопроводности материалов); $\eta = S_{фк}/S_k$ — относительная площадь фактического контакта.

Определение параметров η и ϕ представляет собой сложную задачу. Поэтому при расчете удельного сопротивления фактического кон-

08

такта $R_{M.уд}$ находят отношение $\eta/\phi = (pB/E)^{0.8}$, где p — удельное

давление в контакте; B — коэффициент, характеризующий геометрические свойства поверхностей; E — модуль упругости материала. Выражение для отношения η/φ справедливо для поверхностей с чистотой обработки от 3-го до 10-го класса, материалов с модулем упругости $E > 10^{10}$ Па и при относительных нагрузках на контактных поверхностях $p/E = 5 \cdot 10^{-6} \dots 5 \cdot 10^{-4}$. Значение коэффициента B находят из графика рис. 5.28.

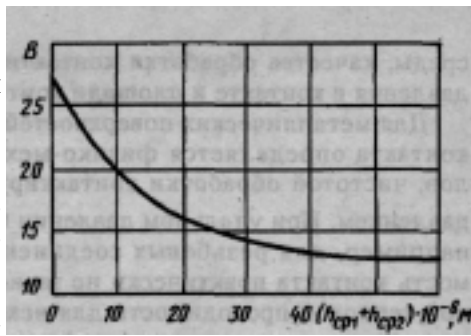


Рис. 5.28. График зависимости коэффициента B от шероховатости контактирующих поверхностей

После подстановки в формулу (5.43) выражения для η/φ формула расчета удельного сопротивления фактического контакта принимает вид

$$R_{\text{м.уд}} = 10^{-4} \cdot [2.12 \lambda_{\text{м}} (pB/E)^{0.8}]^{-1} \text{ м}^2 \text{ К/Вт.}$$

Тепловая проводимость прослойки межконтактной среды $\sigma_{\text{с.уд}} = \lambda_{\text{с}} / \delta_{\text{экв}}$, где $\lambda_{\text{с}}$ — коэффициент теплопроводности среды; $\delta_{\text{экв}} = (h_{\text{CP1}} + h_{\text{CP2}})(1 - m_h)$ — эквивалентное расстояние между контактирующими поверхностями; h_{CP1} и h_{CP2} — средние высоты микронеровностей контактирующих поверхностей; m_h — коэффициент заполнения профиля микронеровностей.

Значение $(1 - m_h)$ находят с помощью графика рис. 5.29.

После того как величины $R_{\text{м.уд}}$ и $\sigma_{\text{с.уд}}$ определены, можно найти тепловую проводимость контакта

$$\sigma_{\text{к}} = (1/R_{\text{м.уд}} + \sigma_{\text{с.уд}}) S_{\text{к}}$$

где $S_{\text{к}}$ — площадь контакта.

Таким образом, величина тепловой проводимости контакта зависит от коэффициентов теплопроводности материалов контактирующих поверхностей, теплофизических свойств межконтактной

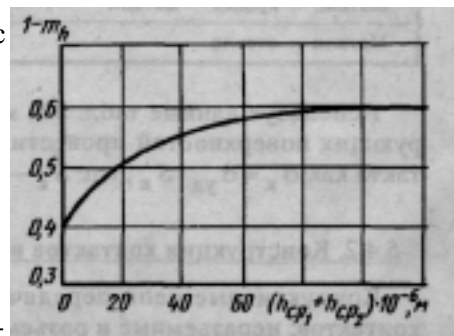


Рис. 5.29. Зависимость коэффициента $(1 - m_h)$ от суммы средних

среды, качества обработки контактирующих поверхностей, удельного давления в контакте и площади контакта.

Для металлических поверхностей удельная тепловая проводимость контакта определяется физико-механическими свойствами материалов, чистотой обработки контактирующих поверхностей и удельным давлением. При удельном давлении более 2000 Н/см^2 , что характерно, например, для резьбовых соединений, удельная тепловая проводимость контакта практически не зависит от давления. Значения удельной тепловой проводимости для некоторых контактирующих материалов с шероховатостью поверхности $R_z = 20$ и удельным давлением в контакте 1000 Н/см^2 приведены в табл. 5.8.

Таблица 5.8

Материал контактирующих	$\sigma_{\text{уд}} \cdot 10^4, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
Медь — алюминий	12,5
Медь — медь	10
Медь — латунь	5,5
Медь — сплав Д16Т	5,0
Сплав Д16Т — сплав Д16Т	4,0
Сталь — медь	1,2
Сталь — сплав Д16	0,83
Сталь — сталь	1,5
Сталь — сталь (резьбовое)	0,17
Металл — краска — металл	0,05
Металл — стекло	3... 6,4

Используя данные табл. 5.8, можно для приведенных пар контактирующих поверхностей провести оценку тепловой проводимости контакта, как $\sigma_{\text{к}} = \sigma_{\text{уд}} \cdot S_{\text{к}}$ где $S_{\text{к}}$ — площадь поверхности контакта.

5.4.2. Конструкции контактов в кондуктивных системах охлаждения

Кондуктивные цепи передачи тепла содержат два вида тепловых контактов: неразъемные и разъемные.

Неразъемные тепловые контакты характерны для конструкций функциональных ячеек и представляют собой звено теплопередачи от тепловыделяющего элемента к теплоотводящей шине. Тепловой контакт обычно обеспечивается за счёт пайки, сварки и склеивания мест соеди-

нений, а также с помощью заклепок и винтов. В последних случаях для уменьшения теплового сопротивления рекомендуется заполнять контакты теплопроводящими пастами (например, КПТ-8) или клеями, использовать в контактах пластичные прокладки из меди, свинца и алюминия. Применение теплопроводящих паст эффективно при шероховатости контактирующих поверхностей выше $R_z = 20$ и позволяет снять зависимость теплового сопротивления контакта от удельного давления.

В конструкциях функциональных ячеек на интегральных микросхемах неразъемные тепловые контакты образуют корпуса микросхем с теплоотводящими шинами.

Вариант установки микросхемы в корпусе типа 4 на теплоотводящую шину показан на рис. 5.30. Теплоотводящая шина 4 монтируется на печатной плате 3 со стороны расположения контактных площадок для пайки выводов микросхем. Микросхема 1 приклеивается к шине, выводы микросхемы распаиваются на контактные площадки 2 печатной платы. Материалом для теплоотводящих шин и кондуктивных теплостокков в виде металлических оснований служат сплавы алюминия, медь и ее сплавы. Применение теплоотводящих шин и металлических оснований позволяет снизить перегрев корпусов микросхем при естественном воздушном охлаждении конструкций приблизительно на (10...20)%. Для достижения указанного эффекта толщина шин и оснований из сплавов алюминия должна быть не менее 1 мм, из меди и ее сплавов — не менее 0,5 мм.

Установка микросхем в корпусах типов 1 и 4 на металлические основания производится согласно рис. 5.31. Основание наряду с функцией кондуктивного теплостокка обычно выполняет роль несущего элемента конструкции. На основании закрепляется печатная плата 2, пайка выводов микросхем производится в отверстиях (рис. 5.31,а) или окнах (рис. 5.31,б), выполненных в основании. Как и в случае с теплоотводящей шиной,

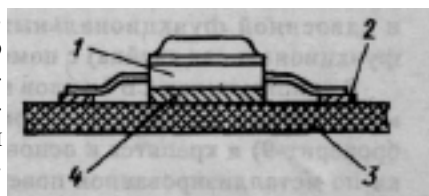


Рис. 5.30. Установка микросхемы на теплоотводящую шину

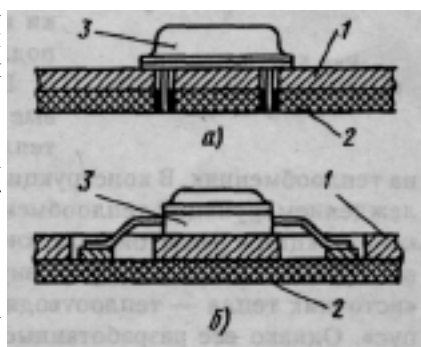


Рис. 5.31. Установка микросхем на металлические основания: а — микросхема в корпусе типа 1; б — микросхема в корпусе типа 4

микросхемы для уменьшения теплового сопротивления между основанием и корпусами устанавливаются на основании с помощью клея. Величина теплового сопротивления контакта зависит от теплопроводности клея. При увеличении коэффициента теплопроводности клея от 0,2 до 1,8 Вт/(м • К) перегрев микросхем, установленных на алюминиевых основаниях, снижается приблизительно на 10%, на медных основаниях — на 23%.

Кондуктивные теплостоки в виде металлических рамок с планками и оснований используются в конструкциях функциональных ячеек цифровых РЭС на бескорпусных микросборках. Микросборки закрепляются на планках металлических рамок (конструкции односторонней и двусторонней функциональных ячеек) и основаниях (двухсторонняя функциональная ячейка) с помощью клея.

В конструкциях СВЧ-узлов подложки микросборок выполняются из материалов с высоким коэффициентом теплопроводности (поликор, брокерит-9) и крепятся к основанию-теплоотводу или с помощью пайки по металлизированной поверхности подложки, или одним из механических способов, обеспечивающих надежный тепловой электрический контакт.

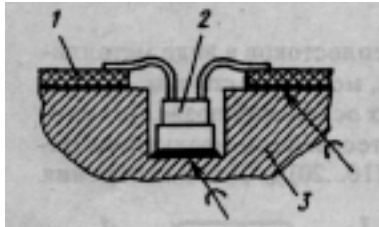


Рис. 5.32. Фрагмент конструкции СВЧ-устройства на микросборках

Фрагмент конструкции СВЧ-устройства на микросборках приведен на рис. 5.32. Бескорпусные СВЧ-микросборки 1 припаиваются к основанию — теплоотводу 3. Мощный транзистор 2 размещается в специальном углублении непосредственно на основании и закрепляется с помощью пайки по металлизированной поверхности подложки.

Разъемные тепловые контакты (тепловые разъемы) обеспечивают сток тепла с тепловых шин и металлических оснований на теплообменник. В конструкциях РЭС с естественным воздушным охлаждением функции теплообменника выполняет корпус или элементы конструкции с развитой поверхностью (радиаторы). Включение теплового разъема создает непрерывную кондуктивную цепь теплопередачи «источник тепла — теплоотводящая шина — тепловой разъем — корпус». Однако все разработанные и применяемые в конструкциях РЭС тепловые разъемы имеют недостатки: сложность конструкции, неудобство в эксплуатации, низкая производственная технологичность и др. Следует также иметь в виду, что использование тепловых разъемов ведет к ухудшению массогабаритных показателей конструкций РЭС.

Тепловые разъемы принято классифицировать по типу рабочего элемента, замыкающего цепь теплопередачи от функциональной ячейки 1 к теплообменнику 2 (рис. 5.33); рабочими элементами тепловых разъемов служат ребро, паз, цилиндр, конус, клин и плоскость.

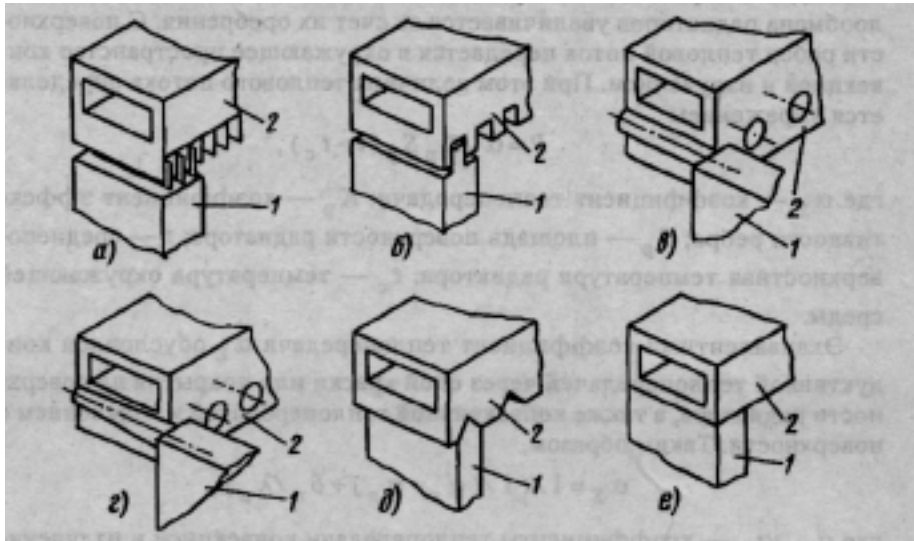


Рис. 5.33. Конструкция тепловых разъемов с рабочими элементами:
a — ребро; *б* — паз; *в* — цилиндр; *г* — корпус; *д* — клин; *е* — плоскость

Величина теплового сопротивления в разьеме определяется площадью поверхности теплопередачи (рис. 5.33, *a*), повышением точности соединения (рис. 5.33, *б, в*) и усилием сжатия поверхностей (рис. 5.33. *г, д, е*).

Пример реализации кондуктивной цепи теплопередачи в конструкции РЭС дан на рис. 5.34. На печатной плате 5 с двух сторон установлены теплоотводящие шины 4, на которых закреплены корпуса интегральных микросхем 3. Теплоотводящие шины соединены с ребристым тепловым разъемом 2. В ответной части разъема предусмотрен канал 1 системы принудительного жидкостного охлаждения. Конструкция обладает низким тепловым сопротивлением по всей плате (0.3...0.45K/Вт) и обеспечивает возможность оперативной замены ячеек в устройствах.

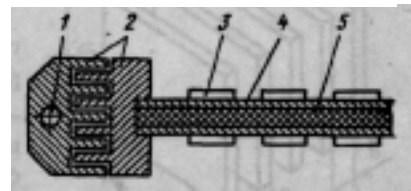


Рис. 5.34. Конструкция ФЯ с тепловым разъемом

5.4.3. Основы расчета радиаторов

В кондуктивных системах охлаждения функции теплообменников с окружающей средой часто выполняют радиаторы — элементы системы охлаждения с развитой поверхностью теплообмена. Поверхность теплообмена радиаторов увеличивается за счет их оребрения. С поверхности ребер тепловой поток передается в окружающее пространство конвекцией и излучением. При этом величина теплового потока определяется выражением

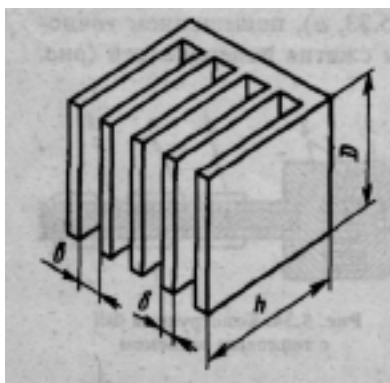
$$P = a_S K_p S_p K(t - t_c),$$

где a_S — коэффициент теплопередачи; K_p — коэффициент эффективности ребра; S_p — площадь поверхности радиатора; t — среднесurfaceная температура радиатора; t_c — температура окружающей среды.

Эквивалентный коэффициент теплопередачи a_S обусловлен кондуктивной теплопередачей через слой краски или покрытия на поверхности радиатора, а также конвективной теплопередачей и излучением с поверхности. Таким образом,

$$a_S = 1 / (1 / (\alpha_k + \alpha_l) + \delta_{\Pi} / \lambda_{\Pi}),$$

где α_k , α_l — коэффициенты теплопередачи конвекцией и излучением; λ_{Π} — коэффициент теплопроводности покрытия; δ_{Π} — толщина покрытия.



Коэффициент эффективности ребра характеризует температурный перепад по высоте ребра h (рис. 5.35):

$$K_p = th(mh) / (mh),$$

где $m = \sqrt{aU / \lambda F}$ — параметр, характеризующий форму ребра ($a = \alpha_k + \alpha_l$, U — периметр сечения ребра, λ — коэффициент теплопроводности материала ребра, F — площадь поперечного сечения ребра).

Если на поверхности нет оребрения, то коэффициент эффективности ребра

$$K_p = 1$$

Рис. 5.35. Ребристый радиатор воздушного охлаждения

Конвективный коэффициент теплопередачи α_k определяется по критери-

а также уравнениям (5.4) и (5.5). При этом характерный размер конструкции радиатора $L=b/2$, где b — расстояние между ребрами.

Для пластинчатого радиатора с вертикально ориентированными ребрами критерий Нуссельта рассчитывается по формулам:

$$Nu = 1.4[\sqrt{(1 + 0.113GrL/D) + 0.33GrL/D} - (1 + 0.113GrL/D)] \text{ при } GrL/D < 7$$

$$Nu = 0,64 + 0,023GrL/D \text{ при } 7 \leq GrL/D < 20;$$

$$Nu = 0,5(GrL/D) \text{ при } GrL/D \geq 20,$$

где D — длина ребра радиатора (см. рис. 5.35).

Коэффициент теплопередачи излучением $\alpha_{\text{л}}$ находят по формулам (5.33), (5.34) и (5.36).

Расчет радиаторов заключается в определении параметров конструкции при заданном перегреве поверхности (проектный расчет) или в определении перегрева поверхности при известных геометрических размерах радиатора (проверочный расчет). Задача решается методом последовательных приближений.

5.5. Тепловые режимы конструкций РЭС с естественным воздушным охлаждением

Естественное воздушное охлаждение конструкций РЭС является наиболее простым, надежным и дешевым способом охлаждения и осуществляется без дополнительной затраты энергии. В конструкциях с естественным воздушным охлаждением отсутствует конструктивная избыточность, поскольку функции элементов системы охлаждения выполняют элементы, образующие структуру конструкции. Однако эффективность естественного воздушного охлаждения относительно низка (см. табл. 5.7). Поэтому данный вид охлаждения может применяться в конструкциях РЭС, работающих в облегченном тепловом режиме.

Передача тепла от конструкции окружающей среде осуществляется конвекцией и излучением. Вывод тепла на корпус конструкции от внутренних источников происходит за счет всех трех видов теплопередачи.

Различают две разновидности конструкций РЭС, в которых применяется естественное воздушное охлаждение: конструкции с герметичным для тепловых процессов кожухом и конструкции с перфорированным кожухом. Применительно к последним естественное воздушное охлаждение называют естественной воздушной вентиляцией.

Процессы теплообмена конструкций с окружающей средой в значительной степени определяются их структурой. Поэтому все существующие конструкции РЭС можно разделить на классы, для каждого из которых характерна тепловая модель и набор показателей, необходимых для оценки теплового режима. Одним из признаков классификации может служить структура нагретой зоны конструкции (расположение в конструкции источников тепла). На основе этого признака произведена классификация рассмотренных ниже конструкций РЭС.

5.5.1. Тепловое моделирование и расчет теплового режима конструкций РЭС с источниками тепла, распределенными в объеме

К данному классу конструкций РЭС относятся конструкции блоков книжного, верного и разъемного типов. Общим для них является то, что нагретая зона представляет собой объем, занимаемый собранными в блок функциональными ячейками (ФЯ). Самая «горячая» точка конструкций — центр нагретой зоны.

Схематическое изображение конструкции приведено на рис. 5.36, а. Блок функциональных ячеек (нагретая зона) 1 размещен в корпусе 2 и закреплен на корпусе с помощью установочных элементов (бобышек, втулок, кронштейнов, угольников и др.) 3.

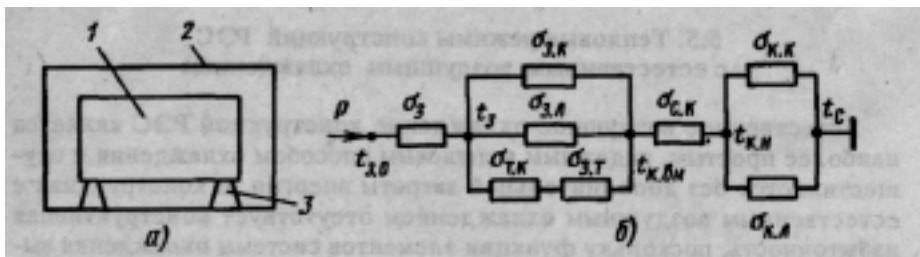


Рис. 5.36. Тепловая модель конструкции блока с объемной нагретой зоной:
а — схематическое изображение конструкции; б — тепловая схема

При построении тепловой модели принимаются следующие допущения:

- нагретая зона является однородным анизотропным телом;
- источники тепла в нагретой зоне распределены равномерно;
- поверхности нагретой зоны и корпуса — изотермические со среднеповерхностными температурами t_3 , $t_{\lambda B}$, $t_{\lambda B}$ соответственно.

Тепло от центра нагретой зоны с температурой t_{30} теплопроводностью (эквивалентная тепловая проводимость σ_3) выводится на поверхность нагретой зоны.

С поверхности нагретой зоны посредством конвективной ($\sigma_{3к}$) и лучевой ($\sigma_{3лз}$) теплопередачи через воздушные прослойки, теплопроводностью контакта «нагретая зона — установочные элементы» ($\sigma_{тк}$) и самих установочных элементов ($\sigma_{зг}$) тепло передается на внутреннюю поверхность корпуса. За счет теплопроводности стенок ($\sigma_{ск}$) тепло выводится на наружную поверхность корпуса, откуда конвекцией ($\alpha_{кк}$) и излучением ($\alpha_{кл}$) переносится в окружающее пространство.

Тепловая схема, отражающая процесс теплообмена в конструкции, приведена на рис. 5.36.б. Критериальной оценкой теплового режима конструкций является температура в центре нагретой зоны $t_{3.0}$. Как следует из тепловой схемы рис. 5.36, б,

$$t_{3.0} = t_3 + P/\sigma_3$$

$$t_3 = t_{к.вн} + P \left(s_{3.к.} + s_{3.л} + \frac{s_{т.к.} s_{з.т.}}{s_{т.к.} + s_{з.т.}} \right)$$

$$t_{к.вн} = t_{к.н} + P/\sigma_{ск}$$

$$t_{к.н} = t_c + P/(\sigma_{кк} + \sigma_{кл})$$

Здесь P — тепловой поток, рассеиваемый конструкцией;

σ_3 — тепловая проводимость нагретой зоны от центра к ее поверхности:

$$s_3 = \frac{4l_z l_x l_y}{cl_z}$$

где λ_z — эквивалентный коэффициент теплопроводности нагретой зоны по направлению z ; l_x , l_y , l_z — приведенные геометрические размеры нагретой зоны по соответствующим направлениям осей координат; C — коэффициент формы нагретой зоны, определяемый по графикам рис. 5.16;

$\sigma_{3к}$ — конвективно-кондуктивная тепловая проводимость между нагретой зоной и внутренней стенкой корпуса:

$$s_{3.к.} = \frac{\kappa_{п} l_B}{l_{CP}} (s_3 + s_{к.вн.}) / 2$$

где $\kappa_{п}$ — поправочный коэффициент на конвективный теплообмен в условиях ограниченного пространства; $\lambda_{в}$ — коэффициент теплопро-

водности воздуха для среднего значения температуры воздуха в прослойке; l_{CP} — среднее расстояние между нагретой зоной и кожухом; S_3 — площадь поверхности нагретой зоны; $S_{к.вн}$ — площадь внутренней поверхности корпуса;

$\sigma_{3л}$ — тепловая проводимость теплопередачи от нагретой зоны к внутренней стенке корпуса излучением:

где $\alpha_{л}$ — коэффициент теплопередачи излучением; $\sigma_{тк}$ — тепловая проводимость контакта между нагретой зоной и установочными элементами;

$\sigma_{3т}$ — тепловая проводимость установочных элементов:

$$s_{3т.} = \frac{nI}{l} S_{CP}$$

где n — число элементов; λ — коэффициент теплопроводности материала; l — длина установочных элементов по направлению теплового потока; S_{CP} — площадь средней изотермической поверхности, перпендикулярной направлению теплового потока;

$\sigma_{ск}$ — тепловая проводимость стенок кожуха;

$$s_{CK} = \frac{l_{CK}}{d_{CK}} (S_{к.вн} + S_{к.н}) / 2$$

где $\lambda_{ск}$ — коэффициент теплопроводности материала корпуса; $\delta_{ск}$ — толщина стенки; $S_{к.вн}$, $S_{к.н}$ — площади внутренней и наружной поверхностей корпуса;

$\sigma_{кк}$ — тепловая проводимость от наружной поверхности корпуса к среде для конвективной теплопередачи:

$$\sigma_{к.к} = \alpha_{к} S_{к.н}$$

где $\alpha_{к}$ — коэффициент теплопередачи; $\sigma_{кл} = \alpha_{л} S_{кн}$ — тепловая проводимость от наружной стенки корпуса к среде для теплопередачи излучением; $\alpha_{л}$ — коэффициент теплопередачи излучением.

Расчет показателей теплового режима блоков может быть выполнен методом последовательных приближений или тепловой характеристики. В ориентировочных расчетах для определения тепловой проводимости s_3 от центра нагретой зоны к ее поверхности можно воспользоваться [20] усредненными значениями эквивалентных коэффициентов

теплопроводности нагретой зоны: $\lambda_x = \lambda_z = 0,35 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $\lambda_y = 0,09 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Оси координат Ox и Oz лежат в плоскости плат функциональных ячеек, ось Oy — перпендикулярна плоскостям плат.

Для условий теплообмена в ограниченном пространстве коэффициент теплопередачи излучением $\alpha_{лз}$ может быть принят равным $7 \text{ Вт/(м}^2\text{-К)}$.

Порядок расчета тепловой контактной проводимости $\sigma_{тк}$ изложен в разд. 5.4.1.

При малой толщине стенки ($\delta_{ск} = 1,5...2 \text{ мм}$) тепловым сопротивлением стенок корпуса, выполненного из металлических сплавов с высоким коэффициентом теплопроводности, обычно пренебрегают. Однако если используется корпус из пластмассы, то тепловую проводимость стенок $\sigma_{ск}$ необходимо учитывать.

Для определения конвективного α_k и лучевого α_l коэффициентов теплопередачи в условиях неограниченного пространства (теплообмен между наружной стенкой кожуха и окружающей средой) можно воспользоваться номограммами рис. 5.9 и 5.10.

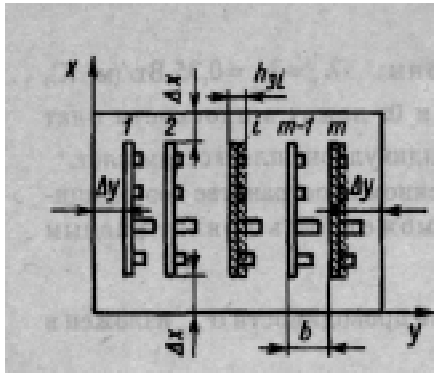
5.5.2. Расчет собственного и наведенного перегрева

Перегрев любой точки или области конструкции является результатом взаимодействия источников тепла. Он складывается из собственного и наведенного перегревов. Собственный перегрев определяется действием источника тепла, расположенного в j -й точке при условии, что остальные источники выключены. Наведенный перегрев обусловлен действием всех источников тепла, кроме расположенного в j -й точке.

Для расчета собственного и наведенного перегревов тепловая модель должна быть детализирована до выделения отдельных источников тепла или групп источников. Решение задачи иллюстрируется на примере блока разъемного типа, когда каждая функциональная ячейка рассматривается как нагретая зона с распределенными в ней источниками тепла. Данная модель позволяет рассчитывать собственный и наведенный перегревы функциональных ячеек и получать распределение температуры внутри нагретой зоны блока.

Схематическое изображение конструкции блока приведено на рис. 5.37.

В металлическом корпусе I размещено m функциональных ячеек, собранных на корпусированных ИС. Каждая ячейка представляет собой нагретую зону. Поверхности всех m нагретых зон — изотермические с



температурами t_{zi} . Высота i -й нагретой зоны $h_{zi} = K_{iz}b + \delta_{п}$, где K_{iz} — коэффициент заполнения i -й функциональной ячейки; b — шаг размещения ячеек в блоке; $\delta_{п}$ — толщина печатной платы.

Из-за малых воздушных зазоров теплообмен между функциональными ячейками (2...3 мм) можно рассматривать как процесс передачи тепла теплопроводностью через ограниченную многослойную стенку.

От плат функциональных ячеек к корпусу и от корпуса к окружающей среде изображение блока кассетной тепло передается конвекцией и излучением. конструкции

Поверхности корпуса и функциональных ячеек (нагретых зон) принимают за изотермические со среднеповерхностными

температурами $t_{к}$ и t_{zi} . Кроме того, считают, что функциональные ячейки однотипны по конструкции, коэффициенты заполнения всех плат одинаковы, воздушный зазор между ячейками $b_1 = b - h_{zi}$ постоянен по всей площади платы.

Перегрев поверхности каждой ячейки складывается из собственного перегрева $\Delta t_{.}$, обусловленного действием только собственных источников тепла P_i и наведенного $\Delta t_{fн}$ в результате действия источников тепла всех ФЯ, кроме i -й.

Тепловые схемы блока для расчета собственного и наведенного перегревов приведены на рис. 5.38 и 5.39 соответственно. На схемах приняты следующие обозначения: t_c — температура окружающей среды; $\Delta t_{к}$ — перегрев корпуса блока; $t_{3,-}$, $\Delta t_{3,-}$ — среднеповерхностная температура и перегрев i -й функциональной ячейки; $R_{\sigma 0}$ — тепловое сопротивление воздушной прослойки между крайними ячейками и кожухом; R_{σ} — тепловое сопротивление между соседними ячейками; $R_{в}$ тепловое сопротивление воздушных прослоек между торцевыми поверхностями ФЯ и кожухом.

Предполагается, что тепловой поток P_i рассеиваемый нагретой зоной i -й ФЯ, распространяется влево и вправо от ячейки.

При этом часть теплового потока, идущая в левую сторону, $P_{ил}$ обратно пропорциональна тепловому сопротивлению левой от i -й функциональной ячейки ветви $P_{ил}$. Составляющая теплового потока, рас-

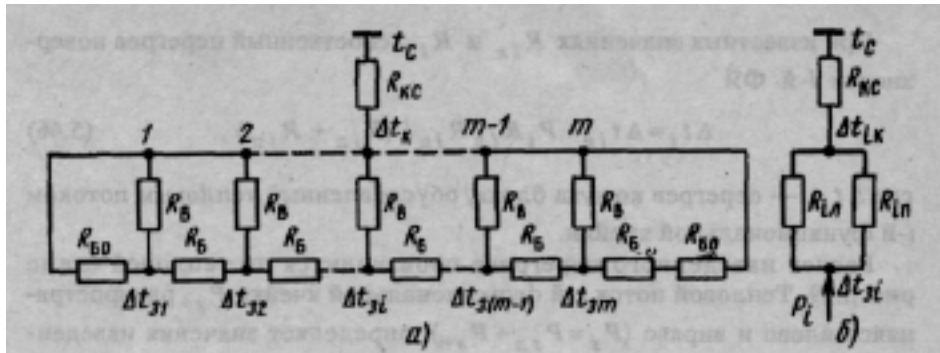


Рис. 5.38. Тепловая схема блока для расчета собственного перегрева:
 а — исходная схема; б — преобразованная

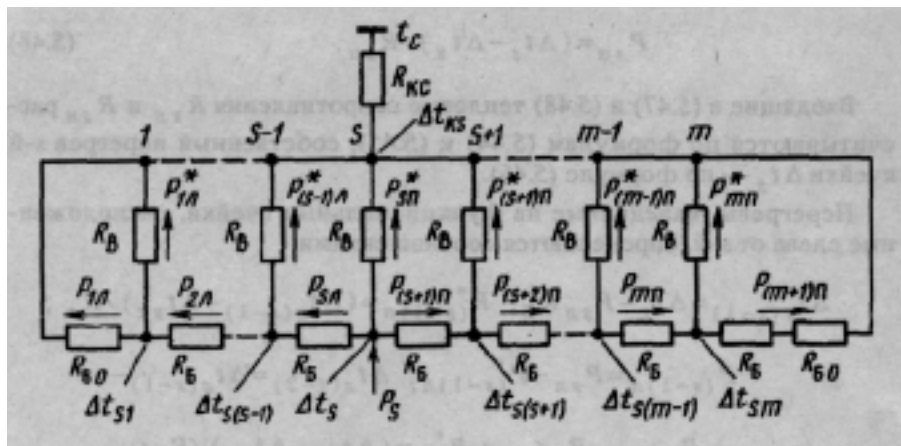


Рис. 5.39. Тепловая схема блока для расчета наведенного перегрева

простирающаяся в правую сторону, $P_{iП}$ обратно пропорциональна тепловому сопротивлению правой ветви $P_{iП}$ (рис. 5.38, б).

Как следует из тепловой схемы рис. 5.38, а,

$$R_{iЛ} = [R_{(i-1)Л}(R_B + R_E) + R_B R_E] / (R_{(i-1)Л} + R_B). \quad (5.44)$$

$$R_{iП} = [(R_E + R_{(i+1)П})R_B] / (R_B + R_E + R_{(i+1)П}), \quad (5.45)$$

где $R_{1Л} = R_{Б0}$, $i=1, 2, \dots, m$.

При известных значениях $R_{i_{л}}$ и $R_{i_{п}}$ собственный перегрев поверхности i -й ФЯ

$$\Delta t_{i,} = \Delta t_{ik} + P_i R_{i_{л}} R_{i_{п}} / (R_{i_{л}} + R_{i_{п}}) \quad (5-46)$$

где Δt_{ik} — перегрев кожуха блока, обусловленный тепловым потоком 1-й функциональной ячейки.

Расчет наведенного перегрева производится по тепловой схеме рис. 5.39. Тепловой поток s -й функциональной ячейки P_s , распространяясь влево и вправо ($P_s = P_{s_{л}} + P_{s_{п}}$), определяет значения наведенных на соседних ячейках перегревов. Из схемы рис. 5.39

$$P_{s_{л}} = (\Delta t_s - \Delta t_{sk}) / R_{s_{л}} \quad (5-47)$$

$$P_{s_{п}} = (\Delta t_s - \Delta t_k) / R_{s_{п}} \quad (5.48)$$

Входящие в (5.47) и (5.48) тепловые сопротивления $R_{s_{л}}$ и $R_{s_{п}}$ рассчитываются по формулам (5.44) и (5.45), собственный перегрев s -й ячейки Δt_s — по формуле (5.46).

Перегревы, наведенные на функциональные ячейки, расположенные слева от s -й, определяются соотношениями:

$$\Delta t_{s(s-1)} = \Delta t_s - P_{s_{л}} R_{\sigma}; P^*_{(s-1)л} = (\Delta t_{s(s-1)} - \Delta t_{sk}) / R_B$$

$$P_{(s-1)л} = P_{s_{л}} - P^*_{(s-1)л}; \Delta t_{s(s-2)} = \Delta t_{s(s-1)} - P_{(s-1)л} R_{\sigma}; \dots$$

$$\dots; P^*_{2л} = (\Delta t_{s2} - \Delta t_{sk}) / R_B; P_{2л} = P_{3л} - P^*_{2л}; \Delta t_{s1} = \Delta t_{s2} - P_{2л} R_{\sigma}$$

Перегревы, наведенные на ФЯ, расположенные справа:

$$P^*_{s_{п}} = (\Delta t_s - \Delta t_{sk}) / R_B; P_{(s+1)п} = P_{s_{п}} - P^*_{s_{п}};$$

$$\Delta t_{s(s+1)} = \Delta t_s - P_{(s+1)п} R_{\sigma}; P^*_{(s+1)п} = (\Delta t_{s(s+1)} - \Delta t_{sk}) / R_B$$

$$P_{(s+2)п} = P_{(s+1)п} - P^*_{(s+1)п}; \dots; P_{mп} = P_{(m-1)п} - P^*_{(m-1)п}$$

$$\Delta t_{sm} = \Delta t_{s(m-1)} - P_{mп} R_{\sigma}$$

Перегрев поверхности i -й функциональной ячейки с учетом собственного и наведенного перегревов согласно принципу суперпозиции можно найти как

$$\Delta t_{zi} = \Delta t_i + \sum_{\substack{S=1 \\ S \neq i}}^m \Delta t_{Si}$$

Тепловое сопротивление $R_{\sigma 0}$ обусловлено конвективно-кондуктивной и лучевой теплопередачами через воздушную прослойку между боковой поверхностью крайней платы и внутренней боковой стенкой кожуха:

$$R_{\sigma 0} = \Delta y / (\kappa_{\text{п}} \lambda_{\text{в}} S_{\text{ср}} + \alpha_{\text{л}} S_{\text{пл}} \Delta y),$$

где Δy — толщина воздушной прослойки; $\kappa_{\text{п}}$ — поправочный коэффициент на конвективную теплопередачу; $\lambda_{\text{в}}$ — коэффициент теплопроводности воздуха; $S_{\text{ср}} = 0,5(S_{\text{пл}} + S_{\text{стб}})$ — площадь средней изотермической поверхности; $S_{\text{пл}} = l_{\text{плх}} l_{\text{плз}}$ — площадь поверхности платы ФЯ; $l_{\text{плх}}$, $l_{\text{плз}}$ — геометрические размеры платы; $S_{\text{стб}}$ — площадь внутренней боковой стенки кожуха; $\alpha_{\text{л}}$ — коэффициент теплопередачи излучением.

Тепловое сопротивление $R_{\text{в}}$ характеризует конвективно-кондуктивную и лучевую теплопередачу между торцевой поверхностью функциональной ячейки и внутренней поверхностью кожуха, охватывающей торцевые поверхности ФЯ (нагретых зон):

$$R_{\text{в}} = \Delta x / (\kappa_{\text{п}} \lambda_{\text{в}} S_{\text{ср}} + \alpha_{\text{л}} S_{\text{ит}} \Delta x),$$

где Δx — средняя толщина воздушной прослойки между торцевой поверхностью нагретых зон и внутренней поверхностью кожуха; $S_{\text{ср}} = 0,5(S_{\text{ит}} + S_{\text{квн}})$ — площадь средней изотермической поверхности; $S_{\text{ит}} = 2 h_{\text{з}}(l_{\text{плх}} + l_{\text{плз}})$ — площадь торцевой поверхности i -й нагретой зоны; $S_{\text{квн}}$ — площадь внутренней поверхности кожуха, охватывающей торцевые поверхности нагретых зон.

Тепловое сопротивление между соседними платами $R_{\sigma} = b / \lambda_{\text{у}} S_{\text{пл}}$, где $\lambda_{\text{у}}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности нагретой зоны блока по направлению y . Определение $\lambda_{\text{у}}$, производится в результа-

те моделирования нагретой зоны блока, состоящей из m функциональных ячеек, однородным анизотропным телом.

5.5.3. Тепловое моделирование и расчет теплового режима блоков цифровых РЭС на микросборках

Блоки цифровых РЭС на микросборках обычно выполняются в виде конструкций книжного типа (см. рис. 3.10). Нагретая зона микроблока состоит из функциональных ячеек на металлических рамках, выполняющих функции несущих элементов конструкции и кондуктивных теплосточков.

Процессы теплообмена можно представить тепловой моделью конструкций с источниками тепла, распределенными в объеме (см. разд. 5.5.1).

Однако при определении тепловой проводимости между центром и поверхностью нагретой зоны a_3 в конструкции ФЯ (рис. 5.40) свойство «дальнего порядка» частично нарушается, поскольку не все элементы конструкции имеют одинаковые геометрические формы и не выполняется требование периодичности их размещения. Поэтому параметры модели нагретой зоны в виде однородного анизотропного тела получают на основе выбора в качестве элементарной тепловой ячейки функциональной ячейки микроблока (системы с «ближним порядком»).

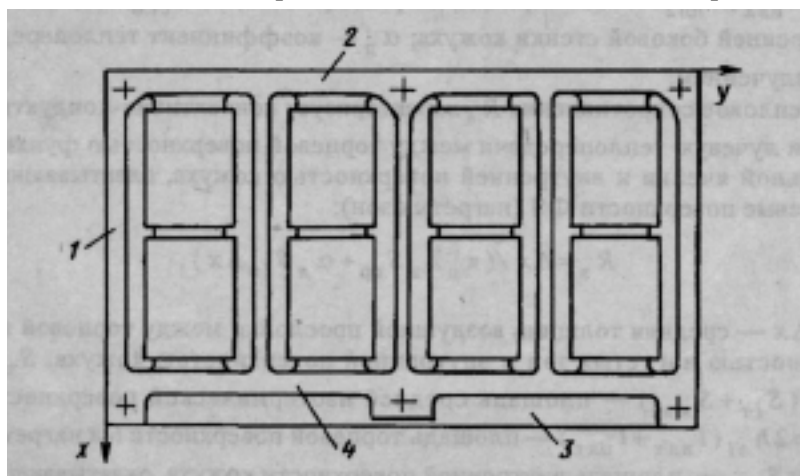


Рис. 5.40. Конструкция односторонней функциональной ячейки

Как видно из рис. 5.40, тепло по направлению x в конструкции ФЯ передается преимущественно через боковые ребра жесткости рамки 1 и

печатную плату 3. Другие элементы конструкции, обладающие относительно высокими коэффициентами теплопроводности, включены последовательно с воздушными прослойками ($\lambda_{\text{в}} = 0,025 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$).

Аналогичен механизм передачи тепла через элементы конструкции ФЯ в направлении y . Основными цепями переноса тепла являются верхнее 2 и нижнее 4 ребра жесткости рамки.

По направлению z тепло в пределах ФЯ передается через винты, стягивающие ячейки в пакет, и через ребра жесткости рамки 1 и 2, по которым осуществляется тепловой контакт между ячейками в пакете.

Таким образом, тепловые проводимости ФЯ по направлениям осей координат:

$$\sigma_{\text{яx}} = 2\lambda_{\text{р}}S_{\text{р1}}/l_{\text{р1}}; \sigma_{\text{яy}} = \lambda_{\text{р}}(S_{\text{р3}}+S_{\text{р4}})/l_{\text{р3}}$$

$$\sigma_{\text{яз}} = \lambda_{\text{вн}}S_{\text{вн}} + \lambda_{\text{р}}S_{\text{кн.р}}/l_{\text{вн}}$$

где $\lambda_{\text{р}}$ — коэффициент теплопроводности материала рамки; $S_{\text{р1}}, S_{\text{р2}}, S_{\text{р3}}$ — площади поперечного сечения соответствующих ребер жесткости рамки; $l_{\text{р1}}, l_{\text{р3}}$ — длины ребер жесткости; $\lambda_{\text{вн}}$ — коэффициент теплопроводности материала стягивающих винтов; $S_{\text{вн}}$ — суммарная площадь поперечного сечения винтов; $S_{\text{кн}}$ — площадь теплового контакта между рамками ФЯ; $l_{\text{вн}}$ — длина винта в пределах рамки или высота рамки.

Тепловые проводимости нагретой зоны по направлениям осей координат

$$\sigma_{\text{zx}} = m\sigma_{\text{яx}}, \sigma_{\text{zy}} = m\sigma_{\text{яy}}, \sigma_{\text{zz}} = \sigma_{\text{яз}}/m$$

где m — число функциональных ячеек в блоке.

Эквивалентные коэффициенты теплопроводности нагретой зоны по направлениям координат:

$$\lambda_x = \sigma_{\text{zx}}l_x/lylz' > \lambda_y = \sigma_{\text{zy}}ly/lx lz > \lambda_z = \sigma_{\text{zz}}lz/l_xly$$

где l_x, l_y, l_z — геометрические размеры нагретой зоны по направлениям координат.

Эквивалентные размеры нагретой зоны для $\lambda_z = \lambda_0, l_{z0} = l_z$:

$$l_{x0} = l_x \sqrt{\frac{I_0}{I_x}}, l_{y0} = l_y \sqrt{\frac{I_0}{I_y}}$$

Через отношения l_z/l_x и l_z/l_y по графикам рис. 5.16 находят коэффициент формы нагретой зоны C , после чего определяют тепловую проводимость между центром и поверхностью нагретой зоны:

$$\sigma_3 = 4\lambda_z l_x l_y / Cl_z.$$

5.5.4. Тепловое моделирование и расчет теплового режима конструкций РЭС с источниками тепла, расположенными в плоскости

Модель распространяется на конструкции блоков и модулей РЭС, выполненных на одной плате, закрепленной на кожухе.

Упрощенное изображение конструкции приведено на рис. 5.41, а, тепловая схема — на рис. 5.41, б. Особенностью таких конструкций является распределение источников тепла в одной плоскости. Механизм теплообмена и тепловая модель в целом аналогичны конструкциям РЭС с источниками тепла, распределенными в объеме (см. рис. 5.36, а). Однако размещение тепловыделяющих элементов в плоскости дает

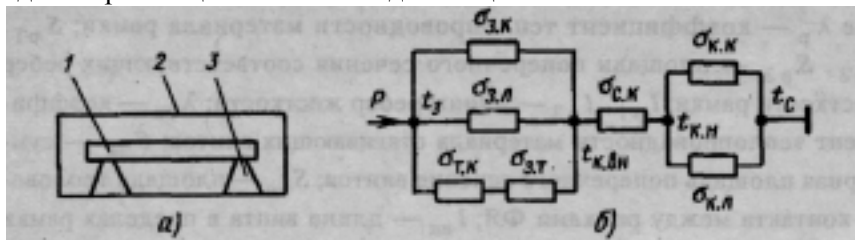


Рис. 5.41. Тепловая модель конструкции блока с пленарной нагретой зоной:
а — упрощенное изображение конструкции; б — тепловая схема

возможность при оценке теплового режима ограничиваться расчетом среднеповерхностной температуры нагретой зоны t_3 , которая с небольшой погрешностью может быть принята в качестве характеристики теплового режима элементов. Структуры тепловых проводимостей на тепловых схемах рис. 5.36, б и 5.41, б полностью совпадают.

5.5.5. Тепловое моделирование и расчет теплового режима конструкций РЭС с естественной вентиляцией

Естественная вентиляция в конструкциях осуществляется за счет перфорации кожухов, что обеспечивает естественное подтекание холодного воздуха к тепловыделяющим элементам и, тем самым, повышает эффективность теплообмена.

Интенсивность свободной конвекции с притоком воздуха извне характеризуется коэффициентом перфорации

$$K_{\Pi} = S_{\text{вх}} / (L_1 L_2)$$

где $S_{\text{вх}}$ — суммарная площадь отверстий в нижней стенке кожуха на входе в блок; L_1, L_2 — геометрические размеры стенки.

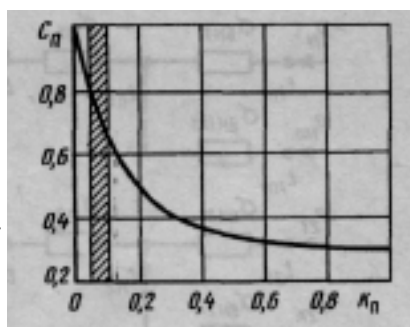
Обычно коэффициент перфорации $K_{\Pi} = 0,05 \dots 0,1$. Входные и выходные отверстия в кожухе выполняются напротив нагретой зоны плат, причем суммарная площадь выходных отверстий в 1,5—2 раза больше $S_{\text{вх}}$

Показатели теплового режима блока с перфорированным кожухом могут быть найдены, если известны показатели для блока с естественным воздушным охлаждением без притока воздуха:

$$\Delta t_{\text{зОЕВ}} = C_{\Pi} \Delta t_{\text{зО}}; \Delta t_{\text{з,ЕВ}} = C_{\Pi} \Delta t_{\text{з}}; \Delta t_{\text{к,ЕВ}} = C_{\Pi} \Delta t_{\text{к}}$$

$\Delta t_{\text{зОЕВ}}, \Delta t_{\text{зО}}, \Delta t_{\text{з,ЕВ}}, \Delta t_{\text{з}}, \Delta t_{\text{к,ЕВ}}, t_{\text{к}}$ — перегревы центра нагретой зоны, поверхности нагретой зоны и поверхности кожуха для конструкций с перфорированным (ЕВ) и глухим кожухом; C_{Π} — поправочный коэффициент, являющийся функцией коэффициента перфорации.

График зависимости C_{Π} от коэффициента перфорации K_{Π} приведен на рис. 5.42.



Таким образом, конструкции блоков с естественной вентиляцией можно представить тепловыми моделями блоков с глухими кожухами и после расчета показателей теплового режима ввести поправку на естественную вентиляцию.

Рис. 5.42. График для определения

5.5.6. Тепловое моделирование конструкций с тепловыделяющими элементами, размещенными на металлических основаниях

Данный класс объединяет конструкции аналоговых МЭА на микросборках. Типичный представитель — конструкции в корпусах типа «пенал». Упрощенное изображение конструкции приведено на рис. 5.43, а.

Бескорпусные микросборки 3 размещены на металлическом основании 2, которое устанавливается в корпус 1. Характерная особенность конструкций — передача тепла от элементов микросборок к корпусу преимущественно теплопроводностью через внутреннюю тепловую

проводимость тепловыделяющих элементов $\sigma_{вн}$, тепловые проводимости подложки микросборки $\sigma_{п}$ и клеевого соединения $\sigma_{кл}$ подложки микросборки и основания. Основание и корпус можно принять за изотермическую поверхность. Передача тепла с поверхности корпуса окружающей среде осуществляется конвекцией и излучением. При условии, что в пределах каждой из n микросборок отсутствует взаимное тепловое влияние между элементами (предусмотрены зоны тепловой защиты элементов) тепловая схема процесса теплообмена в конструкции может быть представлена в виде рис. 5.43,б.

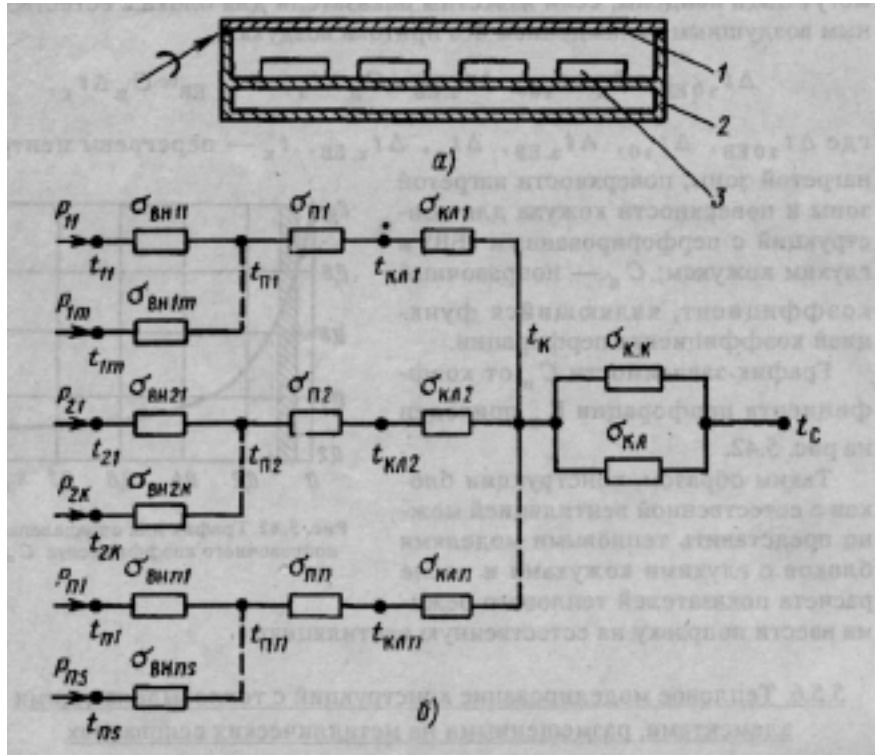


Рис. 5.43. Тепловая модель конструкции пенального типа на микросборках: а — схематическое изображение конструкции; б — тепловая схема

Критериальной оценкой теплового режима конструкции является температура наиболее теплонагруженного или наименее теплостойкого элемента. Температура i -го элемента, расположенного на j -й подложке, может быть найдена как

$$t_{ij} = t_{\Pi j} + P_{ij} / \sigma_{BH\ ij}$$

$$t_{\Pi j} = t_K + \sum_{i=1}^m P_{ij} (1/s_{\Pi j} + 1/s_{K\Pi j})$$

$$t_K = t_C + \sum_{j=1}^n P_j / (s_{KK} + s_{KЛ})$$

где P_{ij} — тепловой поток элемента; P_j — суммарный тепловой поток, выделяемый элементами j -й микросборки; m — число элементов на подложке j -й микросборки; n — число микросборок.

Значения внутренних тепловых проводимостей для бескорпусных интегральных микросхем и транзисторов берут из технических условий на элементы или определяют по тепловой схеме рис. 5.44, б. Исходя из способа установки кристалла на подложке (рис. 5.44, а) тепло от активной области кристалла стекает на подложку 3 через кристалл 1 ($\sigma_{кр}$), слой клея 2 ($\sigma_{кл}$) и выводы 4 ($\sigma_{выв}$).

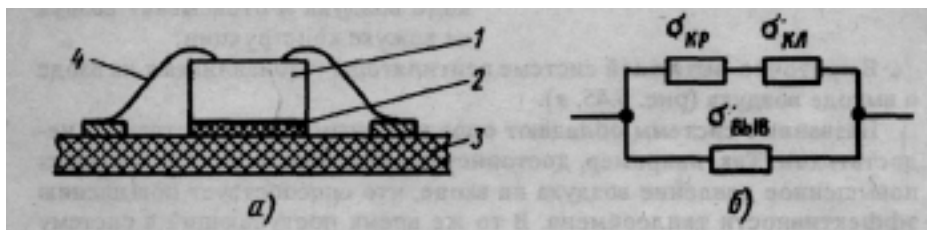


Рис. 5.44. К определению внутренней тепловой проводимости активного бескорпусного элемента : а — вариант установки на подложке; б — тепловая схема

При известных геометрических размерах элементов и коэффициентах теплопроводности материалов определение проводимостей кондуктивной теплопередачи не вызывает затруднений.

5.6. Тепловое моделирование конструкций РЭС с принудительным воздушным охлаждением

Принудительное воздушное охлаждение находит широкое применение в конструкциях РЭС. Это объясняется следующими причинами: удельная тепловая нагрузка конструкций имеет тенденцию роста при установившихся показателях теплоустойчивости элементной базы; наличие доступного и дешевого теплоносителя; относительная простота

конструкций нагнетателя (вентилятора) и воздуховодов. Вместе с тем системам принудительного воздушного охлаждения свойственны и существенные недостатки, такие как наличие акустических шумов и вибрации, увеличение объема и массы конструкций РЭС, снижение надежности изделия и увеличение затрат энергии на охлаждение.

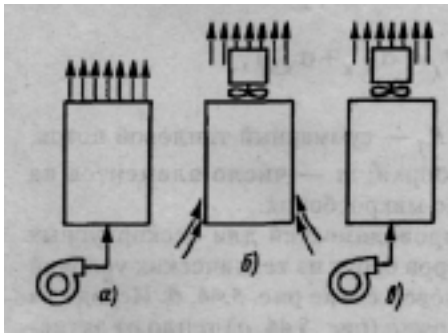


Рис. 5.45. Схемы принудительного воздушного охлаждения:
а — приточная; б — вытяжная;
в — приточно-вытяжная

Используются три системы принудительного воздушного охлаждения: приточная, вытяжная и приточно-вытяжная.

Приточная система (рис. 5.45, а) характеризуется тем, что воздух под давлением, создаваемым нагнетателем, поступает в конструкцию, отбирает тепло от элементов и выбрасывается в окружающую среду или поступает в вытяжной воздуховод (коллектор).

В вытяжной системе (рис. 5.45, б) вентилятор устанавливается на выходе воздуха и отсасывает воздух из кожуха конструкции.

В приточно-вытяжной системе вентиляторы устанавливают на входе и выходе воздуха (рис. 5.45, в).

Названные системы обладают определенными достоинствами и недостатками. Так, например, достоинством приточной системы является повышенное давление воздуха на входе, что способствует повышению эффективности теплообмена. В то же время поступающий в систему воздух имеет повышенную температуру в результате подогрева частью мощности, потребляемой электродвигателем вентилятора. В вытяжной системе воздух на входе имеет давление несколько ниже нормального и поэтому менее эффективен как теплоноситель. Кроме того, в данной системе электродвигатель вентилятора находится в потоке горячего воздуха. Приточная и вытяжная системы имеют общий недостаток: они не препятствуют утечкам воздуха. Этого недостатка лишена приточно-вытяжная система охлаждения, позволяющая в несколько раз снизить утечки. Кажущаяся сложность приточно-вытяжной системы компенсируется лучшими экономическими показателями.

Подход к построению тепловой модели РЭС с принудительным воздушным охлаждением опирается на рассмотренные в разд. 5.2 общие принципы. Однако сложность модели существенно зависит от структуры нагретой зоны конструкции, принятых допущений и взаимодействия потока охлаждающего воздуха с тепловыделяющими элементами.

Обратимся к конструкции блока РЭС с принудительным воздушным охлаждением, схематично изображенного на рис. 5.46, а. Поток охлаждающего воздуха протекает между поверхностью нагретой зоны 2 и кожухом 1 и осуществляет внешний обдув нагретой зоны. Температура воздуха на входе системы охлаждения $t_{вх}$, на выходе — $t_{вых}$. Поверхности нагретой зоны и кожуха считаются изотермическими и имеют среднеповерхностные температуры t_3 и t_k . Предполагается, что воздушный поток прозрачен для излучения.

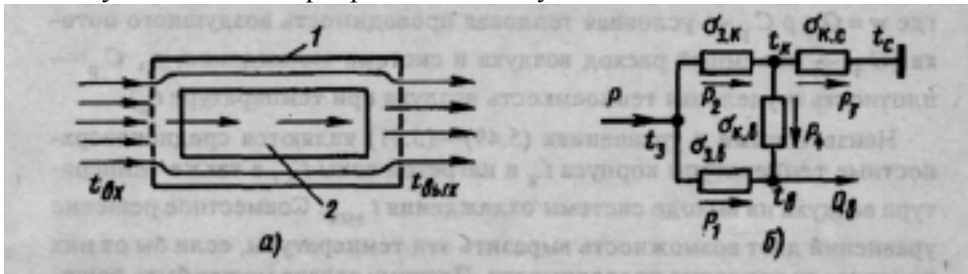


Рис. 5.46. Тепловая модель блока РЭС с принудительным воздушным охлаждением:

а — упрощенное изображение конструкции; б — тепловая схема

Теплообмен в блоке происходит следующим образом. Тепловой поток P , выделяемый элементами нагретой зоны, разделяется на две составляющие, одна из которых (P_1) конвекцией передается воздушному потоку, вторая составляющая (P_2) — излучением на кожух блока. С кожуха часть тепла P_3 рассеивается в окружающей среде (конвекция и излучение), другая часть P_4 уносится воздушным потоком (конвективная теплопередача).

Тепловая схема процесса теплообмена блока приведена на рис. 5.46, б. На схеме приняты следующие обозначения: $\sigma_{3к}$ — тепловая проводимость между нагретой зоной и кожухом блока; $\sigma_{кс}$ — тепловая проводимость кожух—окружающая среда; $\sigma_{зв}$, $\sigma_{кв}$ — тепловые проводимости от нагретой зоны и кожуха к воздушному потоку.

По тепловой схеме составляются алгебраические уравнения, связывающие показатели теплового режима:

$$P = P_1 + P_2; P_2 = P_3 + P_4; \quad (5.49)$$

$$P = \sigma_{3в}(t_3 - t_в) + \sigma_{3к}(t_3 - t_k); \quad (5.50)$$

$$\sigma_{3к}(t_3 - t_k) = \sigma_{кс}(t_k - t_с) + \sigma_{зв}(t_k - t_в)$$

где $t_{\text{в}} = 0,5 (t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}})$ — среднее значение температуры охлаждающего воздуха.

Третье уравнение, необходимое для получения решения, записывается в предположении, что все тепло, кроме рассеиваемого в окружающем пространстве, расходуется на повышение теплосодержания воздушного потока:

$$P = \sigma_{\text{к.с}}(t_{\text{к}} - t_{\text{с}}) + w(t_{\text{вых}} - t_{\text{в}}). \quad (5.51)$$

где $w = G\nu\rho C_p$ — условная тепловая проводимость воздушного потока (G — объемный расход воздуха в системе охлаждения; ρ , C_p — плотность и удельная теплоемкость воздуха при температуре $t_{\text{в}}$).

Неизвестными в уравнениях (5.49)—(5.51) являются среднеповерхностные температуры корпуса $t_{\text{к}}$ и нагретой зоны t_3 , а также температура воздуха на выходе системы охлаждения $t_{\text{вых}}$. Совместное решение уравнений дает возможность выразить эти температуры, если бы от них не зависели тепловые проводимости. Поэтому задача может быть решена методом последовательных приближений или тепловой характеристики. Конвективные коэффициенты теплопередачи от нагретой зоны и внутренней поверхности кожуха находят, используя модели продольного или поперечного обтекания тел воздушным потоком, конвективный коэффициент теплопередачи от кожуха в окружающее пространство — для случая естественной конвекции в неограниченном пространстве.

Наличие в нагретой зоне блока каналов для протекания воздуха изменяет подход к построению тепловой модели и усложняет саму модель. Чтобы убедиться в сказанном, обратимся к блоку кассетной конструкции с принудительным воздушным охлаждением. Схематическое изображение конструкции приведено на рис. 5.47, а. Охлаждающий воздух поступает через воздухораспределитель 3 в межплатные зазоры, поглощает рассеиваемое платами 2 тепло и выходит за пределы кожуха блока 1.

Особенностью процесса теплообмена в блоках этого типа является неравномерность температурного поля как в направлении движения воздуха, так и в поперечном сечении блока. Тем не менее предполагается, что каждая плата представляет собой нагретую зону с изотермической поверхностью. Воздух, проходящий через блок, прозрачен для теплового излучения, коэффициенты конвективного теплообмена поверхностей нагретой зоны и кожуха внутри блока одинаковы.

Оценка стационарного теплового режима блока кассетной конструкции с принудительным воздушным охлаждением является тепло-

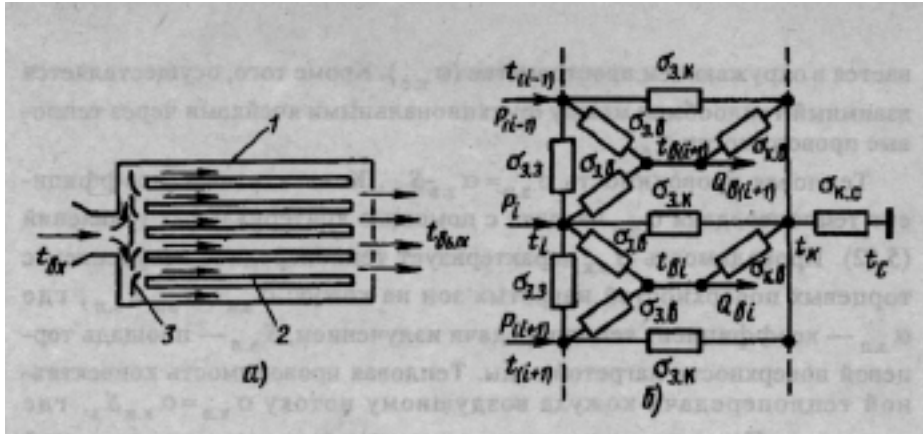


Рис. 5.47. Тепловая модель блока кассетной конструкции с принудительным воздушным охлаждением: а — упрощенное изображение конструкции; б — фрагмент тепловой схемы

физической задачей расчета конвективного теплообмена в плоском канале, образованном поверхностью платы и поверхностью нагретой зоны со стороны тепловыделяющих элементов. При этом ширина канала $\delta_k = b - h_3$, где b — шаг установки функциональных ячеек в блоке, h_3 — высота нагретой зоны.

Исследование принудительного конвективного теплообмена в каналах, образованных платами с установленными на них радиоэлементами (каналы с незначительной шероховатостью), привело к следующим критериальным зависимостям [20]:

$$\begin{aligned}
 Nu &= 0,35Red_3/l_n \text{ при } Red_3/l_n < 11,3; \\
 Nu &= 1,5(Red_3/l_n)^{0,33} \text{ при } Re < 2200; \\
 Nu &= 0,029Re^{0,8}(d_3/l_n)^{0,054} \text{ при } Re > 2200,
 \end{aligned}
 \tag{5.52}$$

где $d_3 = 2(b - h_3) = 2\delta_k$ — эквивалентный гидравлический диаметр; l_n — длина платы в направлении движения охлаждающего воздуха.

Теплофизические параметры воздуха в критериальных уравнениях определяются при температуре $t_{вх}$.

Фрагмент тепловой схемы блока для трех функциональных ячеек приведен на рис. 5.47, б. Каждая из трех ячеек отдает тепло воздушному потоку (тепловая проводимость $\sigma_{3\beta}$), кожуху ($\sigma_{3\kappa}$), часть тепла с кожуха уносится воздушным потоком ($\sigma_{\kappa\beta}$), оставшаяся часть рассеи-

вается в окружающем пространстве ($\sigma_{к с}$). Кроме того, осуществляется взаимный теплообмен между функциональными ячейками через тепловые проводимости $\sigma_{б}$.

Тепловая проводимость $\sigma_{зв} = \alpha_{зв} S_3$. Конвективный коэффициент теплопередачи $\alpha_{зв}$ находят с помощью критериальных уравнений (5.52). Проводимость $\sigma_{зк}$ характеризует теплопередачу излучением с торцевых поверхностей нагретых зон на кожух: $\sigma_{зк} = \alpha_{зл} S_{зл}$, где $\alpha_{зл}$ — коэффициент теплопередачи излучением, $S_{зл}$ — площадь торцевой поверхности нагретой зоны. Тепловая проводимость конвективной теплопередачи кожуха воздушному потоку $\sigma_{кв} = \alpha_{кв} S_k$, где $\alpha_{кв} \approx \alpha_{зв}$. Проводимость $\sigma_{к с}$ характеризует теплопередачу наружной поверхности кожуха окружающей среде конвекцией и излучением. Тепловую проводимость взаимного теплообмена $\alpha_{б}$ находят в результате представления пакета функциональных ячеек однородным анизотропным телом.

5.7. Тепловое моделирование конструкций РЭС с принудительным жидкостным охлаждением

Принудительное жидкостное охлаждение применяется в теплонагруженных конструкциях. Тепло отбирается в результате прокачки через аппаратуру охлаждающей жидкости. Наибольшее распространение этот способ получил при охлаждении больших элементов, представляющих собой локализованные источники тепла. Охлаждающая жидкость прокачивается насосом через специальные каналы, выполненные в платах или кожухе аппаратуры.

Одной из важных задач проектирования системы принудительного жидкостного охлаждения является выбор теплоносителя, который должен отвечать следующим требованиям:

при выбранном режиме движения не должно происходить закипания теплоносителя на охлаждаемых поверхностях;

теплоноситель в системе охлаждения должен быть пожаробезопасным;

если охлаждаемые поверхности, контактирующие с теплоносителем, находятся под электрическим потенциалом, то теплоноситель должен обладать высокими электроизоляционными свойствами;

физические свойства теплоносителя не должны изменяться в диапазоне работы. темпщшуо охлаждаемого объекта.

В качестве теплоносителей обычно применяются вода, водоспиртовые смеси (антифризы), кремнийорганические и фторорганические жидкости. В системах принудительного жидкостного охлаждения возможны все три режима движения теплоносителя: ламинарный, переходный и турбулентный.

В блоках РЭС принудительное жидкостное охлаждение применяется для отвода тепла от кожухов или нагретых зон. При охлаждении кожухов трубопровод прокладывается по наружной или (чаще) по внутренней поверхности кожуха. Конструкция системы принудительного жидкостного охлаждения нагретой зоны блоков зависит от ее структуры. Так, в блоках с шасси трубопровод с теплоносителем прокладывается по верхней или нижней поверхности шасси между элементами и связан с шасси сваркой или пайкой. В блоках с интенсивным тепловыделением часто используются теплообменники «воздух — жидкость», через которые нагретый воздух продувается малогабаритными вентиляторами. Значительная часть тепловой энергии, рассеиваемой нагретой зоной, уносится жидким теплоносителем из теплообменников. Блоки кассетного типа с принудительным жидкостным охлаждением конструктивно аналогичны блокам с воздушным охлаждением. Отличаются они более массивным герметичным кожухом и наличием межплатных каналов для прокачки охлаждающей жидкости. Из входного патрубка теплоноситель через жидкостный распределитель попадает в межплатные каналы. Отбирая из нагретой зоны блока тепло, теплоноситель выходит через другой патрубок, который может располагаться как со стороны входного патрубка, так и с противоположной стороны.

Упрощенное представление конструкции с системой принудительного жидкостного охлаждения дано на рис. 5.48, *а*. Трубопровод с теплоносителем 2 припаян к теплостоку в нагретой зоне 3, температура жидкости на входе системы t_{ex} , на выходе — $t_{\text{вых}}$. Тепло, выделяемое

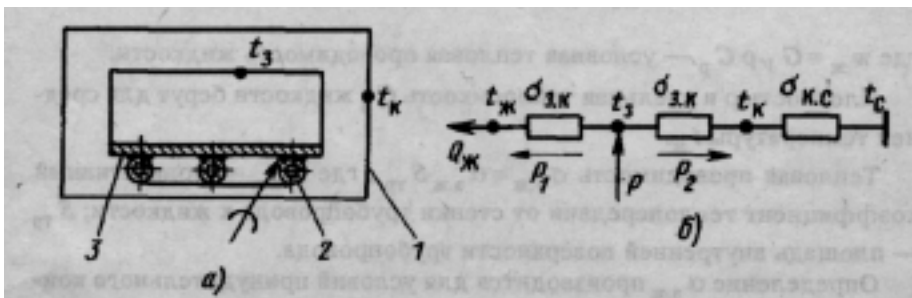


Рис. 5.48. Тепловая модель блока с принудительным жидкостным охлаждением:
а — схематическое изображение конструкции; *б* — тепловая схема

в нагретой зоне, через стенку трубопровода передается охлаждающей жидкости (конвективная теплопередача), конвекцией и излучением — на кожух 1 и с наружной поверхности кожуха — окружающей блок среде. Поверхности кожуха, нагретой зоны с трубопроводом считаются изотермическими, тепловое сопротивление между теплоотводом и трубопроводом мало. Не учитывается из-за малой величины и тепловое сопротивление стенки трубопровода.

Тепловая схема блока приведена на рис. 5.48, б. По схеме составляется система уравнений, связывающих обозначенные переменные:

$$P = P_1 + P_2;$$

$$P_1 = \sigma_{3,ж}(t_3 - t_{ж}); \quad (5-53)$$

$$P_2 = \sigma_{3,к}(t_3 - t_к) = \sigma_{к,с}(t_к - t_с)$$

где $\sigma_{3,ж}$ — тепловая проводимость конвективной теплопередачи от нагретой зоны к жидкости; $\sigma_{3,к}$ — тепловая проводимость теплопередачи конвекцией и излучением через воздушную прослойку от нагретой зоны к кожуху; $\sigma_{к,с}$ — тепловая проводимость, характеризующая теплообмен кожуха с окружающей средой; $t_3, t_к$ — среднетемпературные температуры нагретой зоны и кожуха; $t_{жс} = 0,5(t_{вх} + t_{вых})$ — средняя температура охлаждающей жидкости.

Дополнительное уравнение получают исходя из условия, что все тепло, кроме рассеиваемого в окружающей среде, расходуется на повышение теплосодержания охлаждающей жидкости:

$$P\sigma_{к,с}(t_к - t_с) + w_{ж}(t_{вых} - t_{вх}) \quad (5.54)$$

где $w_{ж} = G \nu \rho C_p$ — условная тепловая проводимость жидкости.

Плотность ρ и удельная теплоемкость C_p жидкости берут для средней температуры $t_{ж}$.

Тепловая проводимость $\sigma_{3,ж} = \alpha_{3,ж} S_{тр}$, где $\alpha_{3,ж}$ — конвективный коэффициент теплопередачи от стенки трубопровода к жидкости; $S_{тр}$ — площадь внутренней поверхности трубопровода.

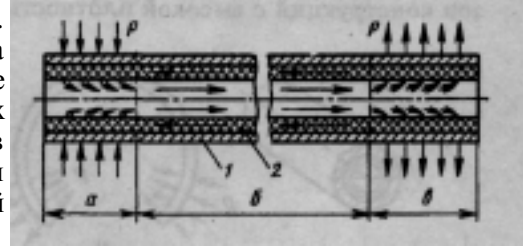
Определение $\alpha_{3,ж}$ производится для условий принудительного конвективного теплообмена в трубах.

Тепловые проводимости $\sigma_{3,к}$ и $\sigma_{к,с}$ характеризуют теплообмен с окружающей средой при естественной воздушной конвекции.

Для определения неизвестных среднеповерхностных температур нагретой зоны t_3 , кожуха t_k и температуры жидкости на выходе системы охлаждения $t_{\text{вых}}$ можно воспользоваться методами последовательных приближений или тепловой характеристики.

5.8. Тепловые трубы

Тепловая труба (ТТ) — испарительно-конденсационное герметичное устройство с использованием капиллярных сил, служащее для передачи тепла и работающее по замкнутому циклу. Конструктивно представляет собой герметичный объем, ограниченный корпусом трубы 1 (рис. 5.49), внутренняя поверхность которого выложена капиллярно-пористой структурой, насыщенной смачивающей жидкостью. Капиллярно-пористая структура может быть реализована в виде металлической сетки, спеченных гранулированных материалов, металловолокну, стеклоткани и системы канавок на внутренней стенке корпуса.



Смачивающая жидкость является теплоносителем, температуры в зоне источника тепла в качестве теплоносителя выбираются жидкие металлы, ртуть, аммиак, вода, ацетон, спирты, фреоны и др. При температурах свыше 750 К используются жидкие металлы, для диапазона температур $550 \text{ K} \leq T \leq 750 \text{ K}$ — ртуть (высокотемпературные ТТ). В области средних температур ($200 \text{ K} < T < 550 \text{ K}$) в качестве теплоносителя применяются органические жидкости, вода (низкотемпературные ТТ), при температурах ниже 200 К теплоносителем служат сжиженные газы (криогенные ТТ).

Тепловая труба делится на три зоны: испарительную a , транспортную $б$ и конденсационную $в$. При подводе тепла к испарительной зоне теплоноситель в этой части капиллярно-пористой структуры начинает испаряться. Пары теплоносителя, пройдя транспортную зону, поступают в конденсационную зону, где в результате конденсации паров выделяется тепло, а жидкость под действием капиллярных и гравитационных сил возвращается в зону испарения.

Таким образом, ТТ является элементом системы охлаждения, способным транспортировать тепло из одной части конструкции в другую

при минимальной разности температур между источником тепла и теплостоком. Другими словами, ТТ аналогична стержню, передающему тепло кондукцией, изготовленному из материалов с коэффициентом теплопроводности $\lambda=10^4 \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Высокая эффективность ТТ обеспечивается при условии, что в конденсационной зоне осуществляется отбор тепла, выделяемого при конденсации, с помощью теплообменника, а тепловые сопротивления между источником тепла и трубой в зоне испарения, а также между трубой и теплообменником в конденсационной зоне малы.

Тепловые трубы могут быть круглые, плоские, гибкие, Y-образные, змеевидные и др. (рис. 5.50). В конструкциях РЭС тепловые трубы выполняют следующие функции: снижение теплового сопротивления между источником и стоком тепла; отвода тепла из труднодоступных зон конструкций с высокой плотностью тепловых потоков; выравнива-

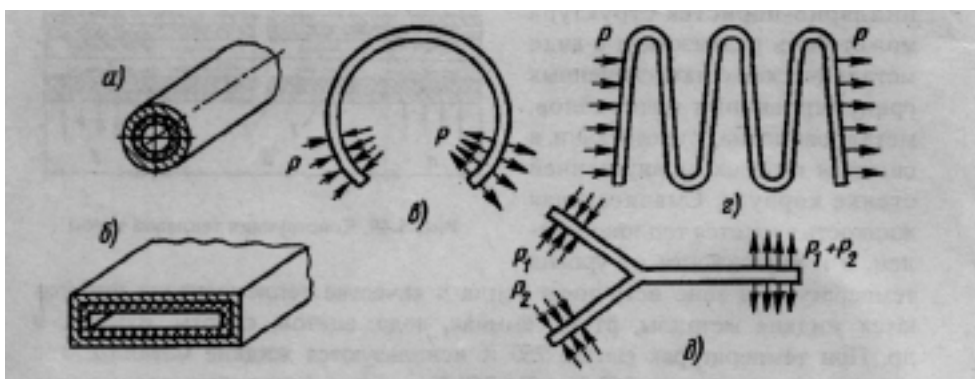


Рис. 5.50, Разновидности конструкции тепловых труб: а — цилиндрическая; б — плоская; в — гибкая; г — змеевидная; д — Y-образная

ние тепловых потоков в пределах конструкции РЭС; сбор тепла от многих источников, расположенных в различных зонах конструкции, к единому стоку тепла, где созданы оптимальные условия теплообмена, и др.

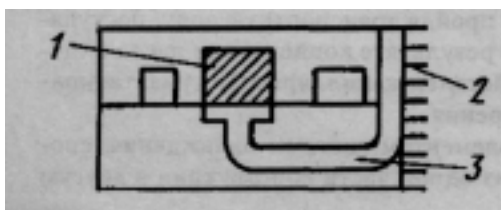
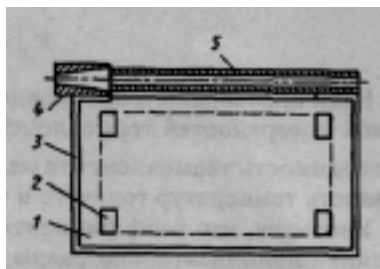


Рис. 5.51. Охлаждение теплонагруженного элемента с помощью тепловой трубы: 1 — охлаждаемый элемент; 2 — радиатор; 3 — тепловая труба

Рис. 5.52. Вариант конструкции функциональной ячейки с тепловой трубой:

- 1 — плата с металлическим теплоотводом;
- 2 — микросхемы;
- 3 — металлическая рамка;
- 4 — теплоприемник;
- 5 — тепловая труба



Пример использования ТТ для отвода тепла от теплонагруженного элемента приведен на рис. 5.51. На рис. 5.52 показан один из возможных вариантов конструкции функциональной ячейки с отводом тепла при помощи тепловой трубы.

5.9. Термоэлектрическое охлаждение конструкций РЭС

Термоэлектрическое охлаждение основано на использовании эффекта Пельтье, заключающегося в том, что на границе (спае) двух различных проводников при протекании электрического тока в зависимости от его направления выделяется или поглощается тепло. Эффект Пельтье проявляется тем сильнее, чем больше термоэлектродвижущая сила в контакте выбранных материалов. Наибольшая термоэлектродвижущая сила возникает на спае двух полупроводников с p - и n -проводимостью. Поэтому спай полупроводников с электронной и дырочной проводимостью является термоэлементом (рис. 5.53). Объединение термоэлементов в батарею позволяет получить термоэлектрические холодильники.

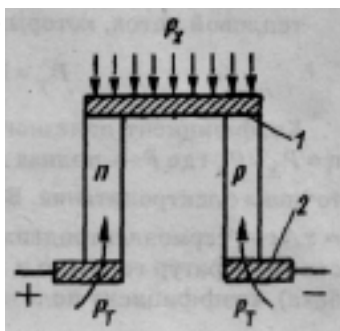


Рис. 5.53. Полупроводниковый термоэлемент

Если источник напряжения включен в соответствии с рис. 5.53, то верхний спай 1 поглощает тепло (холодный спай), на нижнем спае 2 тепло выделяется (горячий спай). К холодному спаю подводится поток P_x от окружающей среды или охлаждаемого объекта, от горячего спаю за счет теплопроводности передается поток P_T . При протекании электрического тока через термоэлемент часть электрической энергии преобразуется в тепловую P_D (джоулевы потери).

В стационарном режиме сумма поступающих к холодному спаю тепловых потоков компенсируется за счет эффекта Пельтье, т.е.

$$P_{\Pi} = P_x + P_T + P_D$$

Если пренебречь теплопередачей в окружающее пространство с боковых поверхностей термоэлемента, то $P_T = \sigma_T \Delta t$, где σ_T — тепловая проводимость термоэлемента между горячим и холодным спаями; Δt — разность температур горячего и холодного спаев.

Учитывая, что коэффициенты теплопроводности p - и n -полупроводника приблизительно равны, $\sigma_T = 2\lambda S/l$ где S — площадь поперечного сечения полупроводниковых элементов; l — их длина.

Предполагая, что джоулево тепло распределяется поровну между холодным и горячим спаями, можно записать $P_D = 0,5I^2 R$, где I — ток, протекающий через термоэлемент; R — электрическое сопротивление термоэлемента.

Поскольку $P_{\Pi} = \pm \Pi I$, где Π — коэффициент Пельтье, холодопроизводительность термоэлемента

$$P_x = \Pi - 0,5I^2 R - \sigma_T \Delta t; \quad (5.55)$$

тепловой поток, который требуется отводить с горячего спая,

$$P_T = \Pi + 0,5I^2 R - \sigma_T \Delta t.$$

Коэффициент полезного действия термоэлемента определяют как $\eta = P_x / P$, где P — полная электрическая мощность, отбираемая от источника электропитания. Ввиду того что $P = UI$, $U = IR + E_T$, где $E_T = \gamma \Delta t$ — термоэлектродвижущая сила, возникающая на спае при разности температур горячего и холодного спаев Δt (γ — коэффициент Зеебека), коэффициент полезного действия

$$\eta = (\Pi - 0,5I^2 R - \sigma_T \Delta t) / (\gamma I \Delta t + I^2 R).$$

Различают два экстремальных режима работы термоэлемента: максимального коэффициента полезного действия и максимальной холодопроизводительности. Первый из режимов обеспечивает минимальные затраты энергии, второй — позволяет при прочих равных условиях снимать большую тепловую нагрузку. Как следует из графического решения уравнения (5.55), представленного на рис. 5.54, максимальной холодопроизводительности соответствует некоторое оптимальное значение тока $I_{ОРТ}$, протекающего через термоэлемент.

Термоэлектрические батареи получают путем последовательного или параллельного включения отдельных элементов. При создании системы охлаждения объекта с помощью термоэлектрической батареи 1

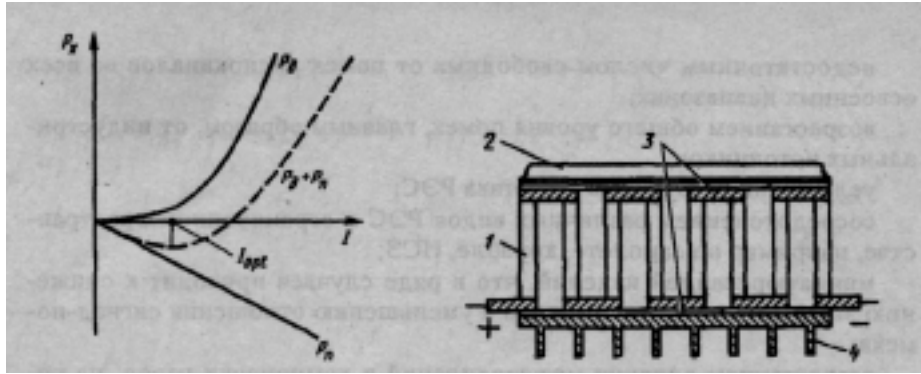


Рис. 5.54. Определение оптимального значения тока термоэлемента

Рис. 5.55. Использование термоэлектрической батареи для охлаждения объекта

предусматривается электрическая изоляция объекта 2 и теплообменника 4 диэлектрическими прокладками 3, выполненными из материала с высоким коэффициентом теплопроводности (рис. 5.55).

Разработанные в настоящее время конструкции термобатарей рассчитаны на площадь охлаждаемых объектов 2...31 мм ; имеют массу 0,01...62 г, объем — 2...760 мм . Потребление от источников электропитания составляет 0,15...8 Вт. **Время** выхода термобатареи на рабочий режим лежит в пределах 2...5 с.

6. КОНСТРУИРОВАНИЕ РЭС С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

6.1. Проблема электромагнитной совместимости

Электромагнитная совместимость (ЭМС) РЭС — это их способность функционировать совместно и одновременно с другими техническими средствами в условиях возможного влияния непреднамеренных электромагнитных помех (НЭМП), не создавая при этом недопустимых помех другим средствам (ГОСТ 23611-79).

Необходимость обеспечения ЭМС различных РЭС, возникшая как следствие научно-технического прогресса в радиотехнике, электротехнике и связи, вызвана следующими основными причинами:

- повышением быстродействия полупроводниковых приборов и электронных схем;
- непрерывным возрастанием общего числа РЭС;

недостаточным числом свободных от помех радиоканалов во всех освоенных диапазонах;

возрастанием общего уровня помех, главным образом, от промышленных источников;

усложнением функций и состава РЭС;

сосредоточением различных видов РЭС в ограниченном пространстве, например на самолете, корабле, ИСЗ;

миниатюризацией изделий, что в ряде случаев приводит к снижению энергии полезных сигналов и уменьшению отношения сигнал-помеха;

возрастанием влияния межсоединений и компоновки узлов на помехоустойчивость и быстродействие РЭС;

трудностью и большими материальными и временными затратами, связанными с поиском и устранением причин низкой помехоустойчивости РЭС.

Анализ проблемы обеспечения ЭМС РЭС [28, 29] показывает, что можно выделить следующие ее научно-технические аспекты:

1. *Радиочастотный ресурс.* Изучение условий пользования радиоканалами для различных радиослужб и условий разработки принципов управления ресурсом, включая экономические концепции.

2. *Непреднамеренные электромагнитные помехи.* Выявление источников и определение энергетических, частотных и временных характеристик НЭМП, моделирование и изучение влияния среды на их распространение, изучение особенностей влияния НЭМП на работу различных рецепторов; совершенствование методов и средств измерений помех; создание НТД на допустимые уровни помех и реализация соответствующих стандартных требований.

3. *Характеристики ЭМС.* Подход к определению роли и значения какой-либо характеристики ЭМС зависит от уровня, на котором решается задача ЭМС. Принято рассматривать три уровня: межсистемный — между отдельными автономными системами; внутрисистемный — внутри сложного радиоэлектронного комплекса; внутриаппаратный, — внутри отдельного прибора (блока), между его узлами и компонентами. Учет требований к ЭМС в процессе конструирования РЭС относится, главным образом, к двум последним уровням обеспечения ЭМС.

4. *Электромагнитная обстановка (ЭМО).* Определение реальных электромагнитных условий, в которых функционирует или должно функционировать конкретное изделие при наличии или отсутствии полезного сигнала на его сигнальном входе в случае действия НЭМП через этот выход или помимо него. В соответствии с тремя уровнями обеспечения ЭМС рассматриваются и три вида ЭМО: между системами, внутри системы и внутри аппарата.

Одним из путей обеспечения ЭМС является совершенствование параметров радиоизлучения и приема РЭС, особенно таких, которые определяют ширину полосы частот радиоизлучения и влияют на ЭМС РЭС. Требования к параметрам радиоизлучений и приема зафиксированы в государственных стандартах и общесоюзных нормах на параметры радиоизмерений и приема РЭС. Основные принципы нормирования параметров ЭМС РЭС, а также методы измерений и контроля соблюдения норм и основные принципы их реализации рассмотрены в [28].

Методология создания и эксплуатации РЭС с учетом ЭМС основана на системном подходе к решению задачи обеспечения ЭМС, который приводит к многоплановости решения задачи на различных уровнях и комплексности решений в двух основных направлениях: повышения помехозащищенности (и помехоустойчивости) рецепторов и снижения энергии помех в их источнике и среде распространения.

К важнейшим требованиям методологии относятся экономическая целесообразность учета ЭМС с самого начала разработки РЭС, реализация требований НТД в части ЭМС на всех стадиях разработки изделий, создание более совершенной НТД, обеспечение контролепригодности РЭС по параметрам ЭМС, функционирование специальных служб ЭМС.

На конструкторско-технологическом этапе разработки РЭС основными способами обеспечения ЭМС являются помехозащита с помощью экранирования, фильтрация помех и рациональное по критериям ЭМС выполнение монтажных соединений и цепей заземления, ослабление помех от источников вторичного питания и компоновка элементов и узлов РЭС, обеспечивающая снижение уровней внутренних помех.

6.2. Экранирование

Экранирование — конструкторское средство ослабления электромагнитного поля помех в пределах определенного пространства. Конструкции, реализующие указанные требования, называются экранами. Экраны применяются как для отдельных ЭРЭ, компонентов МСБ и модулей различных уровней, так и для РЭС в целом, которые могут быть либо источниками, либо рецепторами помех. Необходимость экранирования должна быть обоснована и может рассматриваться только после того, как полностью исчерпаны конструкторские методы оптимальной компоновки изделий.

При анализе помех важное значение имеют понятия о ближней и дальней зонах [29, 33] распространения электромагнитной энергии в зависимости от расстояния до источника помех (ИП) в предположении,

что размеры излучателя помех $l \ll \lambda$, где λ , — длина волны излучения. В ближней зоне на относительных расстояниях от источника $r = \lambda/2\pi \leq 1$ поле еще не сформировалось в плоскую волну и может представлять собой (рис. 6.1) преимущественно поле магнитной индукции H , если в ИП протекает значительный ток при относительно малом напряжении, или поле электрической индукции E , если в источнике протекает малый ток при относительно большом напряжении. «Преимущественно» в том смысле, что хотя ближняя зона всегда характеризуется двумя составляющими индукции H и E , в зависимости от характеристики ИП может преобладать одна из двух составляющих. Электромагнитное поле в виде плоской волны (радиоволны) формируется на расстоянии $r = \lambda/2\pi \geq 2$. Сравнивая волновые сопротивления составляющих поля индукции, можно отметить, что поле E является высокоомным по отношению к волновому сопротивлению плоской волны, а поле H — низкоомным.

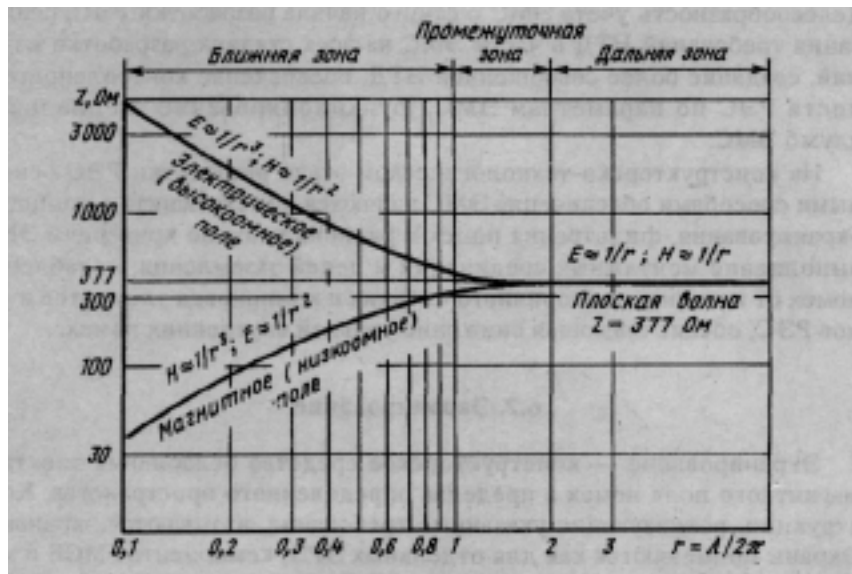


Рис. 6.1. Волновые сопротивления электрической (E) и магнитной (H) составляющих поля ближней зоны распространения в зависимости от расстояния до ИП

Экранирование электрического поля. Основной задачей экранирования электрического поля является снижение емкости связи между экранируемыми элементами конструкции. Рассмотрим электрическую связь источника ИП и рецептора РП помех (рис. 6.2, а) с помощью схемы замещения (рис. 6.2, б), на которой действие электрического поме-

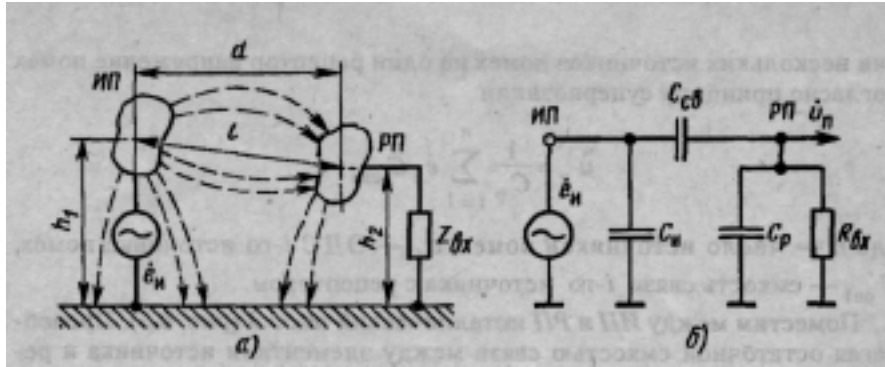


Рис. 6.2. Электрическая связь источника и рецептора помех (а) и обратная схема замещения (б)

хонесущего поля представлено эквивалентной емкостью связи $C_{св}$. Если источник синусоидальный ЭДС $e_{и}$ действует на угловой частоте ω , то напряжение помех в цепи рецептора $u_{п}$ определяется как

$$\dot{U}_n = \dot{e}_{и} \frac{Z_p}{Z_p + 1/j\omega C_{св}} \quad (6.1)$$

где Z_p — комплексное сопротивление цепи рецептора помех, состоящее из параллельно включенных входного сопротивления $R_{вх}$ и емкости C_p относительно корпуса.

Если входное сопротивление РП является чисто активным: $Z_p = R_{вх}$ и $R_{вх} \ll \frac{1}{\omega C_p}$ то напряжение помех

$$\dot{u}_n \approx \dot{e}_{и} j\omega C_{св} + R_{вх}$$

т.е. прямо

пропорционально ЭДС ИП, его частоте, входному сопротивлению рецептора и емкости связи между ИП и РП. При этом цепь переноса помех является дифференцирующей. В случае $R_{вх} \gg \frac{1}{\omega C_{св}}$

гласно (6.1) напряжение помех

$$\dot{u}_n = \dot{e}_{и} c_{св} / (c_{св} + c_p) \quad (6.2)$$

Обычно $C_p \gg C_{св}$, и, следовательно, согласно (6.2) напряжение помех на рецепторе $u_{п} = \dot{e}_{и} C_{св} / C_p$. На фиксированной частоте при дейст-

вии нескольких источников помех на один рецептор напряжение помех согласно принципу суперпозиции

$$u = \frac{1}{C_p} \sum_{i=1}^n \dot{e}_i C_{свi}$$

где n — число источников помех, \dot{e}_i — ЭДС i -го источника помех, $C_{свi}$ — емкость связи i -го источника с рецептором.

Поместим между *ИП* и *РП* металлический лист \mathcal{E} (рис. 6.3). Пренебрегая остаточной емкостью связи между элементами источника и рецептора, определяем уровень наведенного напряжения, пользуясь схемой замещения (рис. 6.3, а), где $C_{иэ}$, $C_{рэ}$ — емкости элементов *ИП* и *РП* относительно металлического листа \mathcal{E} ; $C_{эк}$ — емкость металлического листа относительно корпуса. Напряжение помех на экране

$$\dot{u}'_n = \dot{e}_u C_{иэ} / (C_{иэ} + C_{эк}).$$

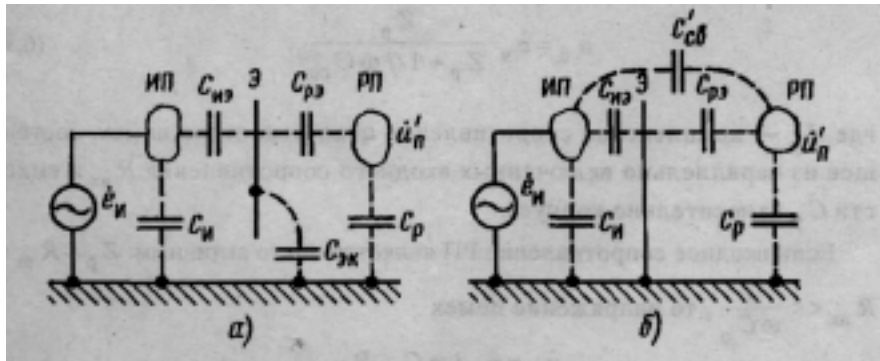


Рис. 6.3. Схема замещения для определения емкостных помех: а — незаземленный экран; б — заземленный экран

Уровень наведенного напряжения определяется как

$$\dot{u}'_n \approx \dot{u}_э C_{рэ} / (C_{рэ} + C_р).$$

Подставляя в полученное выражение напряжение на экране $u_э$, получаем

$$\dot{u}'_n \approx \dot{e}_u C_{иэ} C_{рэ} / (C_{иэ} + C_{эк})(C_{рэ} + C_р). \quad (6.3)$$

Оценим значение наводимых напряжений до установки экрана и после в соответствии с формулами (6.2) и (6.3). Если, например

$C_{эк} \ll C_{из}$, то напряжение на листе согласно (6.3) примерно равно ЭДС источника помех и, следовательно,

$$\dot{u}'_n \approx \dot{e}_u C_{pz} / (C_{pz} + C_p). \quad (6.4)$$

Так как емкость связи между листом и рецептором помех много больше начальной емкости связи между экранируемыми элементами, т.е. $C_{pz} \gg C_{св}$, то при прочих равных условиях наводимое напряжение помех в случае введения листа окажется больше, чем до его установки (6.2). Очевидно, что эффективность экранирования возрастает при увеличении емкости листа на корпус $C_{эк}$ и становится наибольшей при его коротком замыкании (рис. 6.3, б). Это объясняется возможностью стекания на землю зарядов, индуцированных на экране, и замыкания электрической цепи источника помех. При введении заземленного экрана остаточная емкость связи между элементами $C'_{св}$ много меньше начальной, т.е. $C'_{св} \ll C_{св}$, и наводимый уровень помех при этом оказывается много меньше исходного:

$$\dot{u}'_n = \dot{e}_u C'_{св} / (C'_{св} + C_p + C_{pz}) \approx \ddot{e}_u C'_{св} / (C_p + C_{pz}).$$

Выражение для емкости связи двух элементов конструкции, находящихся в свободном пространстве:

$$C_{св} = C_u C_p / 4\pi \epsilon_0 l, \quad (6.5)$$

где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость среды.

Емкость связи с учетом влияния металлического экрана (см. рис. 6.2,а)

$$C_{св} = \frac{C_u}{4\pi \epsilon_0 l} \left(1 - \sqrt{1 + \left(\frac{h_1 - h_2}{d}\right)^2} \right) / \left[1 + \left(\frac{h_1 + h_2}{d}\right)^2 \right] \quad (6.6)$$

Для ослабления влияния связи по электрическому полю в РЭС с учетом формул (6.5) и (6.6) необходимо:

максимально разносить цепи рецепторов и источника помех, что уменьшает $C_{св}$;

компоновать цепи рецептора и источника помех так, чтобы емкость связи $C_{св}$ между ними была минимальной;

уменьшать размеры цепей ИП и РП, что приводит к снижению $C_{св}$;

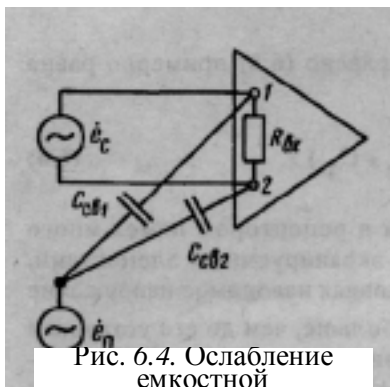


Рис. 6.4. Ослабление емкостной связи путем

применять дифференциальное включение РП, что практически позволяет значительно ослабить влияние емкостных синфазных помех (рис. 6.4).

Основные требования, которые предъявляются к электрическим экранам, можно сформулировать следующим образом:

конструкция экрана должна выбираться такой, чтобы силовые линии электрического поля в основном замыкались на стенке экрана, не выходя за его пределы;

в области низких частот эффективность экранирования практически определяется качеством заземления экрана на корпус изделия и мало зависит от материала экрана и его толщины;

в области высоких частот эффективность экрана, работающего в электромагнитном режиме, наряду с качеством заземления определяется его толщиной, проводимостью и магнитной проницаемостью экрана.

Экранирование магнитного поля. Магнитная связь двух электрических цепей определяется их взаимной индуктивностью M , зависящей

от индуктивностей источника L_u и приемника L_p , помех, представленных на рис. 6.5 в виде сосредоточенных элементов, и коэффициента связи k_L , т.е.

$M = k_L \sqrt{L_u L_p}$. Если в цепи ИП протекает синусоидальный ток I_u с угловой частотой ω , то в цепи приемника изведется ЭДС

$$e_u = -M di_u/dt = -j\omega M I_u.$$

Индукцированная ЭДС вызывает в цепи РП ток, который определяется как

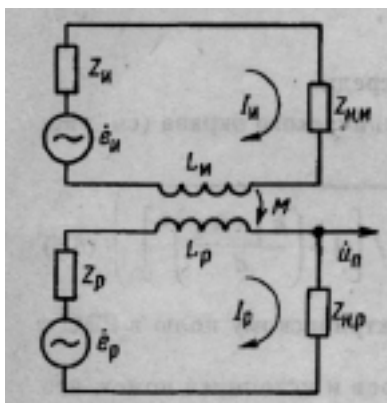


Рис. 6.5. Эквивалентная схема индуктивной связи между электрическими цепями источника и приемника помех

где Z_p , Z_u — внутреннее сопротивление соответственно приемника и источника

помех $I_p = -j\omega M I_u / (j\omega L_p + Z_p + Z_{np})$, где Z_p , Z_u — внутреннее сопротивление соответственно приемника и источника

ника помех; Z_{np} , Z_{nu} — сопротивление нагрузки цепи соответственно рецептора и источника помех.

В результате наведенное напряжение помех на сопротивлении нагрузки рецептора

$$\dot{U}_n = -j\omega M I_u Z_{np} / (j\omega L_p + Z_p + Z_{np}). \quad (6.7)$$

В области низких частот при $\omega L_p \ll Z_p + Z_{np}$ напряжение помех

$$\dot{U}_n \approx -j\omega M I_u Z_{np} / (Z_p + Z_{np}). \quad (6.8)$$

Таким образом, согласно (6.8) в области низких частот напряжение помех, наводимое в цепи рецептора, увеличивается пропорционально частоте и индуктивности связи между ИП и РП. Если $|Z_p| \ll |Z_{np}|$, то напряжение помех

$$\dot{U}_n \approx -j\omega M I_u,$$

т.е. цепь переноса помех является дифференцирующей.

В области достаточно высоких частот (при $\omega L_p \gg |Z_p + Z_{np}|$)

рост напряжения помех в соответствии с выражением (6.8) ограничивается самоиндукцией:

$$\dot{U}_n \approx -M Z_{np} I_u / L_p = -k L Z_{np} I_u \sqrt{L_u} / L_p \quad (6.9)$$

На фиксированной частоте при действии нескольких ИП на один РП согласно принципу суперпозиции и (6.9)

$$\dot{U}_n = Z_{H,P} \sum_{i=1}^n I_{ui} M_i / L_p$$

где n — число источников помех, I_{uj} — ток j -го источника помех, M_i индуктивность связи i -го источника с рецептором.

Для определения влияния конструкторских параметров на магнитную связь рассмотрим широко распространенный случай воздействия ИП в виде достаточно протяженного провода с током I_u на РП, образующий замкнутый контур цепи длиной l , шириной h и находящийся на расстоянии d от ИП в плоскости, перпендикулярной помехо-несущему магнитному полю (рис. 6.6).

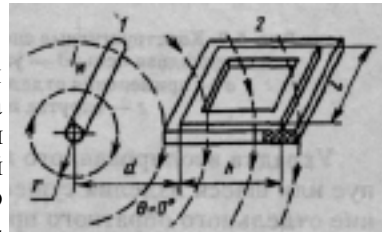


Рис. 6.6. Образование индуктивной связи между проводом и замкнутым контуром проводников на печатной плате

Амплитуда наведенной ЭДС [30]

$$\dot{e}_M = \mu f I_M \ln[(d + h)/d] \cos \Theta$$

в рецепторной цепи при заданной компоновке прямо пропорциональна магнитной проницаемости среды (μ длине контура рецептора l , амплитуде I_m , его частоте f и зависит от взаимного расположения цепей ИП и РП, определяемых углом Θ .

Взаимная индуктивность цепей ИП и РП [29]

$$M = \mu l \ln[(d + h)/d] \cos \Theta / 2\pi.$$

Для ослабления влияния магнитной связи в аппаратуре необходимо: максимально разносить цепи рецепторов и источников помех;

по возможности компоновать цепи РП в плоскости, параллельной направлению воздействующего на них помехонесущего магнитного потока;

уменьшать площадь петли, образованной цепью РП, сокращая длину l и расстояние между проводами h , что снизит магнитный поток, пронизывающий петлю (рис. 6.7, а).

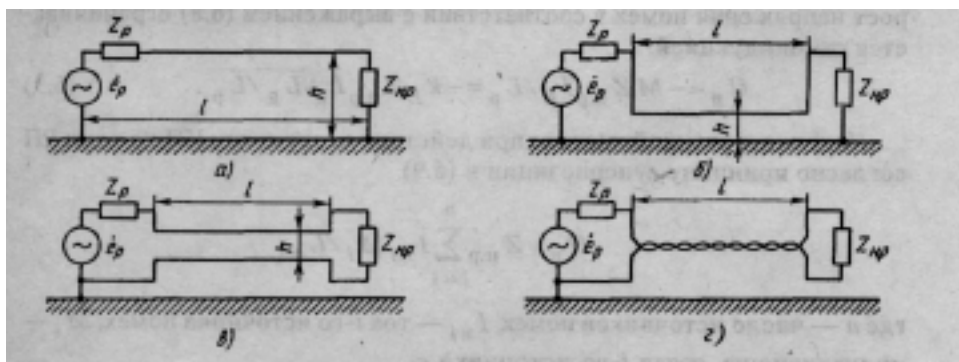


Рис. 6.7. Конструктивные способы уменьшения магнитной связи в цепях:
 а — исходная цепь; б — укладка изолированного провода на шасси;
 в — применение отдельного обратного корпусного провода;
 г — скрутка прямого и обратного проводов

Укладка изолированного прямого провода непосредственно на корпус или шасси изделия существенно снижает h (рис. 6.7, б). Применение отдельного обратного провода в качестве земляного позволяет устранить также кондуктивную связь через общий участок корпуса или шасси (рис. 6.7, в). При скручивании прямого и обратного проводов напряжения на соседних участках линии примерно одинаковы по уровню, но противоположны по знаку (рис. 6.7, г). Малая магнитная связь обес-

печивается и при использовании коаксиального кабеля, так как его оплетка, являющаяся обратным проводом, расположена концентрично относительно внутреннего провода, чем обеспечивается малое h .

Если применение указанных мер при проектировании РЭС ограничено, то для обеспечения трудоемкого ослабления помех необходимо прибегнуть к магнитному экранированию.

Основные методы экранирования магнитных полей основаны на шунтировании магнитного поля ферромагнитными материалами и вытеснении помехонесущего магнитного поля полем вихревых токов в экране.

Основные требования, которые предъявляются к магнитостатическим экранам, можно сформулировать следующим образом:

магнитная проницаемость материалов экрана должна быть возможно более высокой;

увеличение толщины сеток экрана приводит к повышению эффективности экранирования, однако при этом следует принимать во внимание возможные конструктивные ограничения по массе и габаритам;

стыки, разрезы и швы в экране должны размещаться параллельно линиям магнитной индукции;

заземление экрана не влияет на эффективность магнитостатического экранирования.

Экранирование электромагнитного поля. Целью экранирования является ослабление электромагнитного поля в ограниченной части пространства или в окружающем пространстве, если ИП находится внутри экрана. Электромагнитное экранирование охватывает диапазон частот $10^3 \dots 10^9$ Гц.

Эффективность электромагнитного экранирования можно выразить в виде [30]

$$K(\varepsilon) = K(o) + K(n) + K(n)_B \text{ дБ}, \quad (6.10)$$

где $K(o)$ - затухание за счет отражения электромагнитной энергии от границ раздела «диэлектрик—экран» и «экран—диэлектрик»: для основной волны $K(o) = 20 \lg | (Z_D + Z_M)^2 / 4Z_D Z_M |$; $K(n)$ — затухание за счет поглощения: $K(n) = 8,69 | K_M | t / \sqrt{2}$, где t — толщина стенки экрана; $K(n)_B$ — затухание за счет многократных затухающих внутренних переотражений в стенке экрана для остальных составляющих волн: $K(n)_B = 20 \lg | 1 - [(Z_D - Z_M) / (Z_D + Z_M)]^2 \exp(-2k_M t) |$.

При расчетах электромагнитного экранирования обычно пользуются модулями комплексных параметров: величиной, обратной эквива-

лентной глубине проникновения тока в металл $|K_m| = \sqrt{wms}$ и модулем волнового сопротивления металла $|Z_u| = \sqrt{wm/S}$. В зависимости от вида источника помехонесущего поля в расчетную формулу (6.10) подставляются следующие выражения:

$Z_D^T = \sqrt{m_0/e_0}$ — волновое сопротивление воздуха электромагнитному полю;

$|Z_D^H| = \omega\mu_0 d$ — модуль волнового сопротивления воздуха магнитному полю;

$|Z_D^E| = 1/\omega\mu_0 d$ — модуль волнового сопротивления воздуха электрическому полю;

d — расстояние от источника помехонесущего поля до экрана (ближняя зона).

Эффективность экранирования $K(\varepsilon)$ зависит от электрических параметров материалов, размеров и формы экрана, наличия отверстий и т.д. Для обеспечения ЭМС существенно то, что любой реальный экран обладает конечной эффективностью. Рассмотрим некоторые физические факторы, определяющие свойства электромагнитных экранов.

На частотах, при которых размеры экрана значительно меньше длины волны, характерно заметное различие в ослаблении экраном электрического и магнитного полей. Причины типичной зависимости $K(\varepsilon)$ от частоты (1 и 2 на рис. 6.8) состоят в следующем. В электростатическом поле из-за концентрации зарядов на внешней стороне проводника поле внутри экрана отсутствует $K(\varepsilon) = \infty$. В переменном электрическом поле по мере повышения частоты в стенках экрана увеличивается ток, обусловленный сменой знаков индуцированных зарядов. Этот ток сопровождается появлением электрического поля внутри экрана вследствие его конечной проводимости, и $K(\varepsilon)$ при этом уменьшается. При дальнейшем росте частоты сказывается поверхностный эффект; токи концентрируются у поверхности, и поле внутри экрана вновь ослабляется. На низких частотах $K(\varepsilon)$ тем больше, чем толще экран и выше проводимость материала.

Характер ослабления магнитного поля на низких частотах оказывается иным. В постоянном магнитном поле действительны только экраны с относительной магнитной проницаемостью, большей единицы. Эффект экранирования обусловлен преимущественным замыканием силовых линий магнитного поля в толще экрана. В переменном поле по мере роста частоты $K(\varepsilon)$ возрастает вследствие появления вихревых токов. При дальнейшем увеличении частоты за счет поверхностного эффекта экранирующие свойства резко увеличиваются, а $K(\varepsilon)$ тем выше, чем больше толщина стенок и магнитная проницаемость материала. Эф-

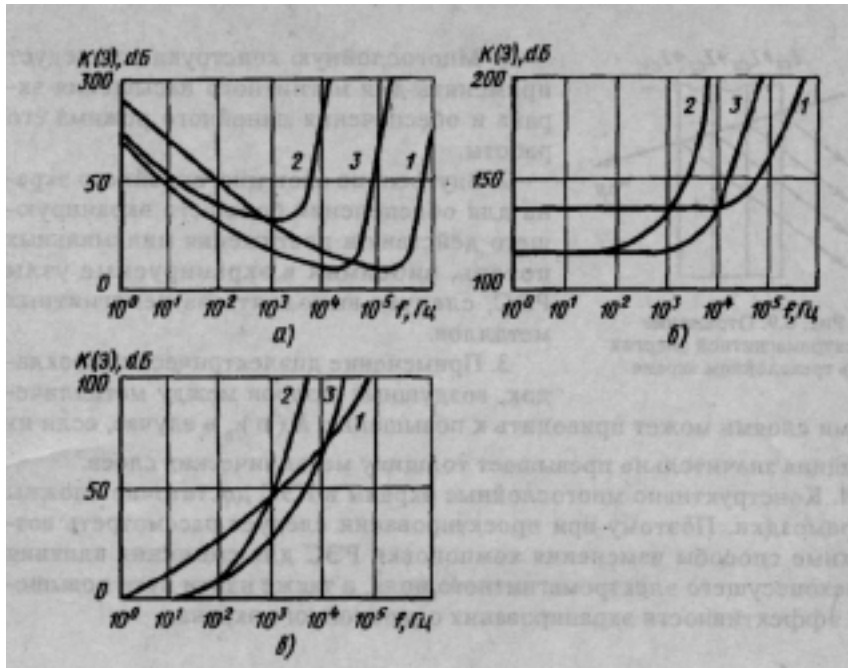


Рис. 6.8. Зависимости эффективности экранирования немагнитными и магнитными металлами от частоты при $d = 1$ м, $t = 1$ мм (кривые 1 — для меди; кривые 2 — для стали с $\mu = 1000$; кривые 3 — для стали с $\mu = 100$):
 а — для электрического поля; б — для электромагнитного поля;
 в — для магнитного поля

эффективность экранирования оказывается наименьшей на низких частотах. Поэтому экранирование ИП, создающего низкочастотное магнитное поле, наименее благоприятно.

Многослойное экранирование. Многослойные комбинированные конструкции экранов, состоящие из последовательно чередующихся слоев, выполненных из немагнитных и магнитомягких металлов, применяются для обеспечения высокой эффективности экранирования в широком частотном диапазоне. В многослойных экранах, составленных из металлов с различными характеристическими сопротивлениями $Z_{c1} \neq Z_{c2} \neq \dots \neq Z_{cn}$, используется система многократных отражений (рис. 6.9). В результате экран, состоящий из нескольких тонких слоев различных металлов, особенно в низкочастотной области, обладает большим экранирующим действием по сравнению с однородным экраном той же толщины.

Основные рекомендации по проектированию многослойных комбинированных экранов [30]:

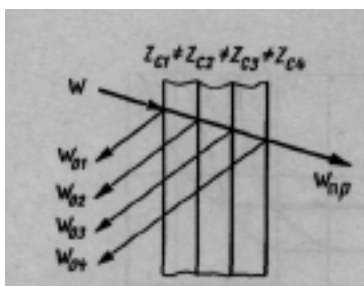


Рис. 6.9. Отражение электромагнитной энергии в трехслойном экране

1. Многослойную конструкцию следует применять для магнитного насыщения экрана и обеспечения линейного режима его работы.

2. Внутренние слои многослойного экрана для обеспечения большего экранирующего действия и достижения минимальных потерь, вносимых в экранируемые узлы РЭС, следует выполнять из немагнитных металлов.

3. Применение диэлектрических прокладок, воздушных зазоров между металлическими слоями может приводить к повышению $K(\text{п})_в$

в случае, если их

толщина значительно превышает толщину металлических слоев.

4. Конструктивно многослойные экраны в РЭС достаточно сложны и громоздки. Поэтому при проектировании следует рассмотреть возможные способы изменения компоновки РЭС для снижения влияния помехонесущего электромагнитного поля, а также найти пути повышения эффективности экранирования однослойного экрана.

6.3. Фильтрация

Фильтрация является основным средством ослабления кондуктивных помех, создаваемых в цепях питания и коммутации постоянного и переменного токов РЭС. Предназначенные для этой цели помехоподавляющие фильтры позволяют снижать кондуктивные помехи как от внешних, так и от внутренних источников. Эффективность фильтрации определяется вносимым затуханием фильтра [31]:

$$S = 20 \lg \left| \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right| = 20 \lg \left| \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} \right| \text{ дБ}$$

где \dot{U}_1, \dot{I}_1 напряжение и ток нагрузки в исходном состоянии;

\dot{U}_2, \dot{I}_2 — напряжение и ток помех на нагрузке в цепи с фильтром.

К фильтру предъявляются следующие основные требования: обеспечение заданной эффективности S в требуемом частотном диапазоне (с учетом внутреннего сопротивления и нагрузки электрической цепи);

ограничение допустимого падения постоянного или переменного напряжения на фильтре при максимальном токе нагрузки;

обеспечение допустимых нелинейных искажений питающего напряжения, определяющих требования к линейности фильтра;

конструктивные требования — эффективность экранирования, минимальные габаритные размеры и масса, обеспечение нормального теплового режима, стойкость к механическим и климатическим воздействиям, технологичность конструкции и т.д.;

элементы фильтра должны выбираться с учетом номинальных токов и напряжений электрической цепи, а также возможных возникающих в ней бросков напряжений и токов, вызванных нестабильностью электрического режима и переходными процессами.

Основные рекомендации по применению помехоподавляющих элементов и фильтров РЭС следующие.

Конденсаторы. Применяются как самостоятельные помехоподавляющие элементы и как параллельные звенья фильтров. Конструктивно помехоподавляющие конденсаторы делятся на:

двухполюсные типа К50-6, К52-1Б, ЭТО, К53-1А;

опорные типа КО, КО-Е, КДО;

проходные некоаксиальные типа К73-21;

проходные коаксиальные типа КТП-44, К10П-4, К10-44, К73-18, К53-17;

конденсаторные блоки.

Основной характеристикой помехоподавляющего конденсатора является зависимость его импеданса от частоты. Для ослабления помех в диапазоне частот примерно до 10 МГц можно использовать двухполюсные конденсаторы с учетом малой длины их выводов. Опорные помехоподавляющие конденсаторы применяются до частот порядка 30...50 МГц. Симметричные проходные конденсаторы используются в двухпроводной цепи до частот порядка 100 МГц. Проходные конденсаторы работают в широком диапазоне частот примерно до 1000 МГц.

Индуктивные элементы. Применяются как самостоятельные элементы подавления помех и как последовательные звенья помехоподавляющих фильтров. Конструктивно наиболее распространены дроссели следующих видов: витковые на ферромагнитном сердечнике; безвитковые.

Основной характеристикой помехоподавляющего дросселя является зависимость его импеданса от частоты. На низких частотах рекомендуется применение магнитодиэлектрических сердечников марок ПП90 и ПП250, изготовленных на основе μ -пермаллоя. Для подавления помех в цепях аппаратуры с токами до 3 А рекомендуется использовать высокочастотные дроссели типа ДМ, при больших номинальных значениях токов — дроссели серии Д200.

Фильтры. Керамические проходные фильтры имеют миниатюрную конструкцию и позволяют эффективно подавлять помехи в широкой полосе частот.

Высокочастотные проходные керамические фильтры типа Б7, Б14, Б23 предназначены для подавления помех в цепях постоянного, пульсирующего и переменного токов в диапазоне частот от 10 МГц до 10 ГГц. Конструкция таких фильтров представлена на рис. 6.10. Вносимое фильтрами Б7, Б14, Б23 затухание в диапазоне частот 10... 100 МГц возрастает приблизительно от 20...30 до 50...60 дБ и в диапазоне частот свыше 100 МГц превышает 50 дБ.

Керамические проходные фильтры типа Б23Б построены на основе дисковых многослойных керамических конденсаторов и безвитковых ферромагнитных дросселей (рис. 6.11). Безвитковые дроссели представляют собой трубчатый ферромагнитный сердечник из феррита марки 50В4-2, одетый на проходной вывод. Индуктивность дросселя составляет 0,08...0,13 мкГн. Корпус фильтра выполнен из керамического материала УФ-61, имеющего высокую механическую прочность. Корпус металлизирован слоем серебра для обеспечения малого переходного сопротивления между наружной обкладкой конденсатора и заземляющей резьбовой втулкой, с помощью которой осуществляется крепление фильтра. Конденсатор по наружному периметру припаян к корпусу фильтра, а по внутреннему — к проходному выводу. Герметизация фильтра обеспечивается заливкой торцов корпуса компаундом.

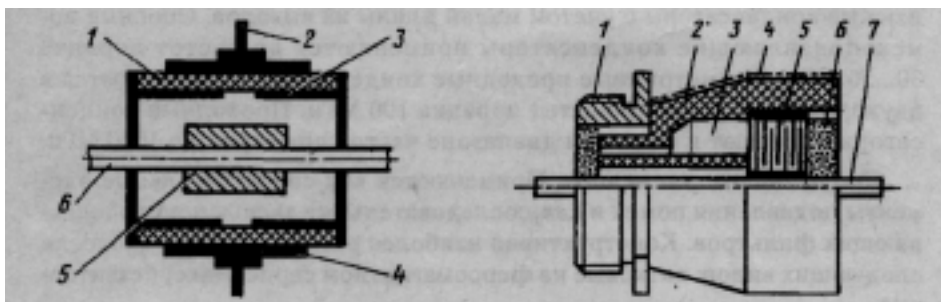


Рис. 6.10. Конструкция керамического проходного фильтра типа Б7:
 1 — сегнетокерамическая трубка;
 2 — крепежный фланец;
 3 — внутренняя обкладка;
 4 — внешняя обкладка;
 5 — безвитковой дроссель;
 6 — токонесущий стержень

Рис. 6.11. Проходной фильтр типа Б23Б:
 1 — резьбовая втулка;
 2 — корпус;
 3 — феррит;
 4 — металлизация;
 5 — конденсатор;
 6 — компаунд;
 7 — токонесущий стержень

Номинальные емкости фильтров — от 0,01 до 6,8 мкФ, номинальное напряжение 50 и 250 В, ток — до 20 А. Габаритные размеры фильтра: длина 25 мм, диаметр 12 мм. Вносимое фильтрами Б23Б затухание в диапазоне частот от 100 кГц до 10 МГц возрастает приблизительно от 30...50 до 60...70 дБ и в диапазоне частот свыше 10 МГц превышает 70 дБ.

Для бортовых РЭС перспективным является применение специальных помехоподавляющих проводов с ферронаполнителями, имеющими высокую магнитную проницаемость и большие удельные потери. Так, у проводов марки ППЭ вносимое затухание в диапазоне частот 10...1000 МГц возрастает с 6 до 128 дБ/м. Известны конструкции многостыревых разъемов, в которых на каждый контакт устанавливается по одному П-образному помехоподавляющему фильтру. Габаритные размеры встроенного фильтра: длина 9,5 мм, диаметр 3,2 мм. Вносимое затухание фильтром в 50-омной цепи составляет 20 дБ на частоте 10 МГц и до 80 дБ на частоте 100 МГц.

Фильтрация цепей питания цифровых РЭС. Импульсные помехи в шинах питания, возникающие в процессе коммутации цифровых интегральных схем (ЦИС), а также проникающие внешним путем, могут приводить к появлению сбоев в работе устройств цифровой обработки информации.

Для снижения уровня помех в шинах питания применяются следующие схемно-конструкторские методы:

- уменьшение индуктивности шин «питание» с учетом взаимной магнитной связи прямого и обратного проводников;

- сокращение длин участков шин «питание», которые являются общими для токов от различных ЦИС;

- замедление фронтов импульсных токов в шинах «питание» с помощью помехоподавляющих конденсаторов;

- рациональная топология цепей питания на печатной плате.

Увеличение размеров поперечного сечения проводников приводит к уменьшению собственной индуктивности шин, а также снижает их активное сопротивление. Последнее особенно важно в случае шины «земля», которая является обратным проводником для сигнальных цепей. Поэтому в многослойных печатных платах желательно выполнять шины «питание» в виде проводящих плоскостей, расположенных в соседних слоях (рис. 6.12, а).

Навесные шины питания, применяемые в печатных узлах на цифровых ИС, имеют большие поперечные размеры по сравнению с шинами, выполненными в виде печатных проводников, а следовательно, и меньшие индуктивность и сопротивление. Дополнительными преимущест-

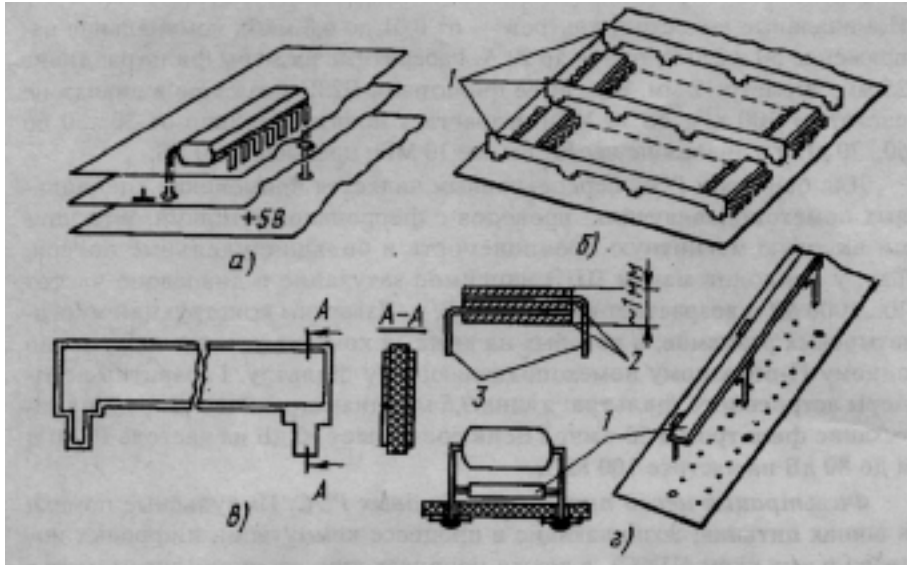


Рис. 6.12. Конструкции шин питания: *a* — в виде проводящей плоскости; *б* — навесные; *в* — двухслойная навесная; *г* —комбинированная навесная; 1 — шина питания; 2 — изоляция; 3 — медные проводники

вами навесных шин являются: упрощение трассировки сигнальных цепей, повышение жесткости печатных плат за счет создания дополнительных ребер, выполняющих также роль ограничителей, которые предохраняют ИС и навесные ЭРЭ от механических повреждений при монтаже и настройке изделия (рис. 6.12, б).

Высокой технологичностью отличаются шины «питание», изготовленные печатным способом и крепящиеся на печатной плате вертикально (рис. 6.12, в). Известны конструкции навесных шин, устанавливаемых под корпусами ИС, которые располагаются на плате рядами (рис. 6.12, г) и играют роль дополнительного теплоотвода. Рассмотренные конструкции шин «питание» обеспечивают также большую погонную емкость, что приводит к уменьшению волнового сопротивления линии «питание» $r = \sqrt{L/C}$ и, следовательно, снижению уровня импульсных помех.

Разводка питания ИС на печатной плате должна осуществляться не последовательно (рис. 6.13, а), а параллельно (рис. 6.13, б). Необходимо использовать разводку питания в виде замкнутых контуров (рис. 6.13, в). Такая конструкция приближается по своим электрическим параметрам к сплошным плоскостям питания. Для защиты от вли-

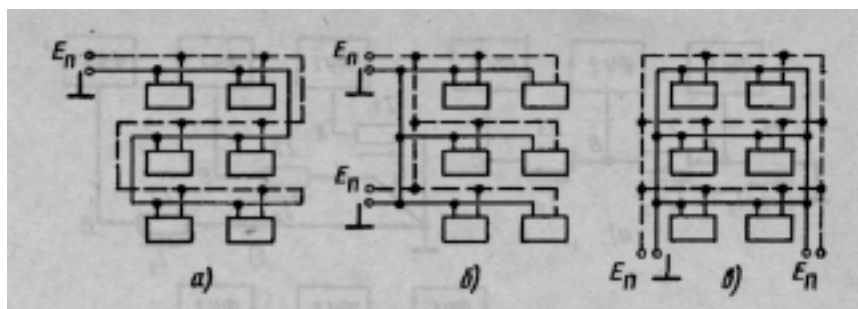


Рис. 6.13. Разводка шин питания: *а* — последовательная; *б* — параллельная; *в* — в виде замкнутых контуров
 яния внешнего помехонесущего магнитного поля по периметру печатной платы следует предусмотреть внешний замкнутый контур.

6.4. Заземление

Система заземления — это электрическая цепь, обладающая свойством сохранять минимальный потенциал, являющийся уровнем отсчета в конкретном изделии. Система заземления в РЭС должна обеспечивать сигнальные и силовые цепи возврата, защищать людей и оборудование от неисправностей в цепях источников питания, снимать статические заряды.

К системе заземления предъявляются следующие основные требования:

- минимизация общего импеданса шины «земля»;
- отсутствие замкнутых контуров заземления, чувствительных к воздействию магнитных полей.

В РЭС требуются как минимум три отдельные цепи заземления:
 для сигнальных цепей с низкими уровнями токов и напряжения;
 для силовых цепей с высокими уровнями потребляемой мощности (источники питания, выходные каскады РЭС и т.д.);
 для корпусных цепей (шасси, панелей, экранов и металлизации).

Электрические цепи в РЭС заземляются следующими способами: в одной точке и в нескольких точках, ближайших к опорной точке заземления (рис. 6.14). Соответственно системы заземления могут быть названы одноточечной и многоточечной.

Наибольший уровень помех возникает в одноточечной системе заземления с общей последовательно включенной шиной «земля» (рис. 6.14, а).

Чем дальше удалена точка заземления от опорной, тем выше ее потенциал. Его не следует применять для цепей с большим разбросом по-

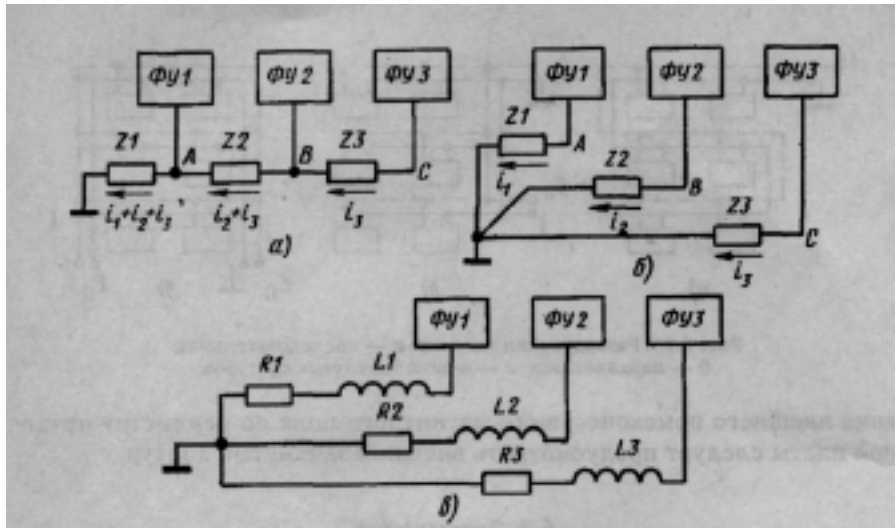


Рис. 6.14. Системы заземления цепей в РЭС: а — одноточечная последовательная; б — одноточечная параллельная; в — многоточечная

требуемой мощности, так как мощные функциональные узлы (ФУ) создают большие возвратные токи заземления, которые могут влиять на малосигнальные ФУ. При необходимости наиболее критичный ФУ следует подключать как можно ближе к точке опорного заземления.

Одноточечная параллельная система заземления (рис. 6.14, б) исключает паразитную связь через общий импеданс, и уменьшается вероятность образования низкочастотного паразитного контура с замыканием на шину «земля». Она может использоваться эффективно для частот 1 МГц.



Рис. 6.15. Схема с плавающим заземлением

Многоточечную систему заземления (рис. 6.14, в) следует использовать для высокочастотных схем ($f > 10$ МГц), подключая ФУ РЭС в точках, ближайших к опорной точке заземления.

Для чувствительных схем применяется схема с плавающим заземлением (рис. 6.15). Такая заземляющая система требует полной изоляции схемы от корпуса (высокого сопротивления и низкой емкости), в противном случае она оказывается малоэффективной. В качестве источни-

ков питания схем могут использоваться солнечные элементы или аккумуляторы, а сигналы должны поступать и покидать схему через трансформаторы или оптроны.

Пример реализации рассмотренных принципов заземления для девятидорожечного цифрового накопителя на магнитной ленте показан на рис. 6.16 [31]. Здесь имеются следующие шины земли: три сигнальные, одна силовая и одна корпусная. Наиболее восприимчивые к помехам аналоговые ФУ (девять усилителей считывания) заземлены с по-

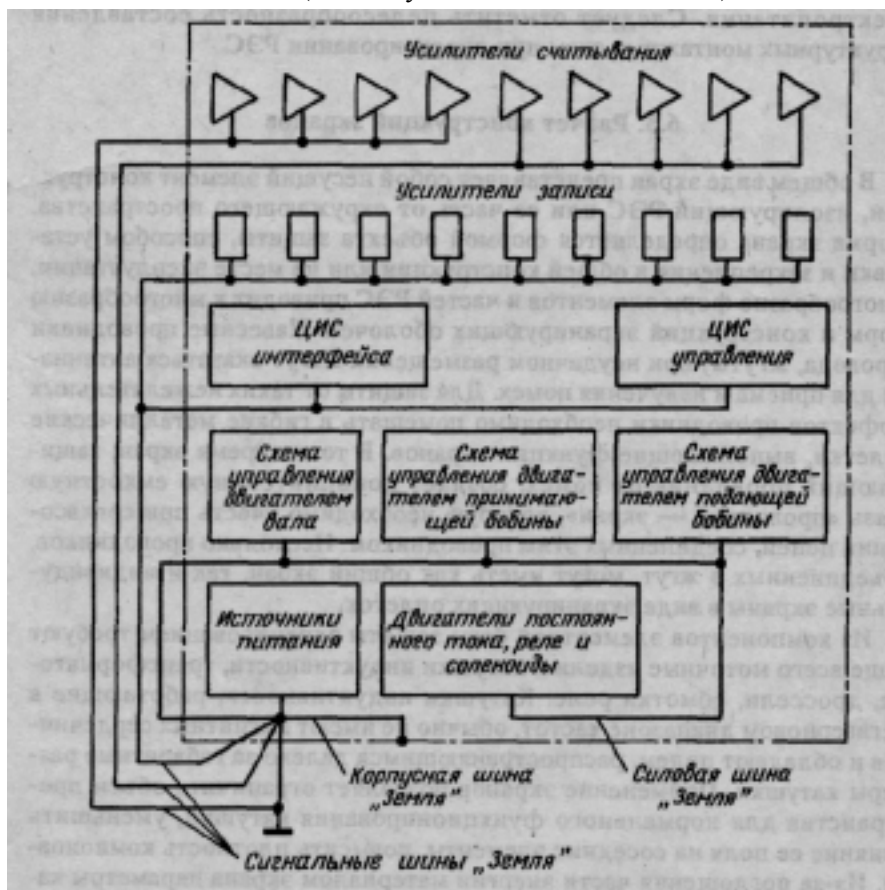


Рис. 6.16. Система заземления девятидорожечного цифрового накопителя на магнитной ленте

мощью двух отдельных сигнальных шин «земля». Девять усилителей записи, работающих с большими, чем усилители считывания, уровнями

сигналов, а также ИС управления и схемы интерфейса с изделиями передачи данных подключены к третьей сигнальной шине «земля». Три двигателя постоянного тока и их схемы управления, реле и соленоиды соединены с силовой шиной «земля». Наиболее восприимчивая схема управления двигателем ведущего вала подключена ближе других к опорной точке заземления. Корпусная шина «земля» служит для подключения корпуса и кожуха. Сигнальная, силовая и корпусная шины «земля» соединяются вместе в одной точке в источнике вторичного электропитания. Следует отметить целесообразность составления структурных монтажных схем при проектировании РЭС.

6.5. Расчет конструкций экранов

В общем виде экран представляет собой несущий элемент конструкции, изолирующий РЭС или ее часть от окружающего пространства. Форма экрана определяется формой объекта защиты, способом установки и закрепления в общей конструкции или на месте эксплуатации. Многообразие форм элементов и частей РЭС приводит к многообразию форм и конструкций экранирующих оболочек. Навесные проводники (провода, жгуты) при неудачном размещении могут оказаться антеннами для приема и излучения помех. Для защиты от таких нежелательных эффектов проводники необходимо помещать в гибкие металлические оплетки, выполняющие функции экранов. В то же время экран, защищающий проводник от помех, создает дополнительную емкостную связь «проводник — экран», которую необходимо учесть при согласо-

вании цепей, соединенных этим проводником. Несколько проводников, объединенных в жгут, могут иметь как общий экран, так и индивидуальные экраны в виде экранирующих оплеток.

Из компонентов элементной базы защиты экранированием требуют чаще всего моточные изделия: катушки индуктивности, трансформаторы, дроссели, обмотки реле. Катушки индуктивности, работающие в мегагерцевом диапазоне частот, обычно не имеют магнитных сердечников и обладают полем, распространяющимся далеко за габаритные размеры катушки. Применение экранов позволяет ограничить объем пространства для нормального функционирования катушки, уменьшить влияние ее поля на соседние элементы, повысить плотность компоновки. Из-за поглощения части энергии материалом экрана параметры катушки необходимо скорректировать. Экранирование дросселей и трансформаторов требуется при использовании повышенных рабочих частот электропитания (более 100 Гц). Активные элементы в виде полупроводниковых диодов, транзисторов, микросхем в большинстве случаев нецелесообразно защищать индивидуальными экранами.

Предпочтительно помещать в такой экран весь функциональный узел, например на печатной плате. Необходимость в этом увеличивается, если схема содержит усилительные каскады с большим коэффициентом усиления. При создании микросборки естественно желание объединить функции экрана и корпуса. Корпус микроблока или микросборки становится внешним экраном. Выбор материала диктуется, с одной стороны, эффективностью защиты, а с другой стороны — производственными условиями, удобством изготовления, возможностью механизации труда и, наконец, просто механической прочностью конструкции. Слагаемые размеров экрана представлены на рис. 6.17 и 6.18. Прежде всего, размеры экрана зависят от габаритных размеров

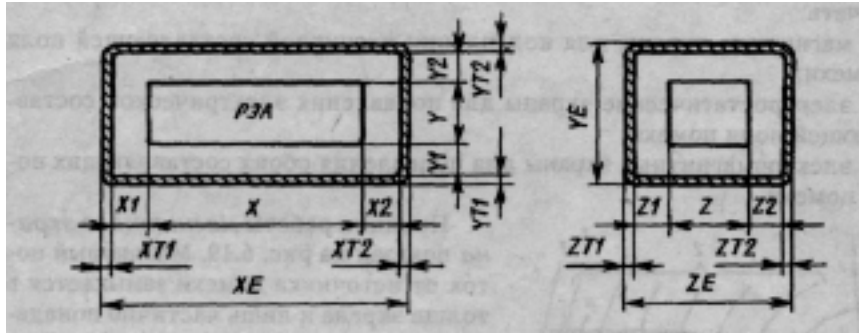


Рис. 6.17. Компонентные размеры экранированного электронного устройства

объекта экранирования X , Y , Z . Далее, между объектом экранирования и внутренней поверхностью экрана должны быть гарантированные зазоры $X1$, $X2$, $Y1$, $Y2$, $Z1$, $Z2$, обеспечивающие удобство сборки, электрическую прочность монтажа, тепловой режим и другие условия, необходимые для нормального функционирования устройства. Толщины стенок экрана $XT1$, $XT2$, $YT1$, $YT2$, $ZT1$, $ZT2$ будут определяться эффективностью подавления помехи, механической прочностью конструкции, удобством закрепления и размещения на объекте. У экрана имеется функциональная поверхность с размерами XF , YF , ZF (одна или несколько), через которую (которые) осуществляется связь экранированной части РЭС с внешними цепями и устройствами: кабельный и жгутовой вводы через разъемные

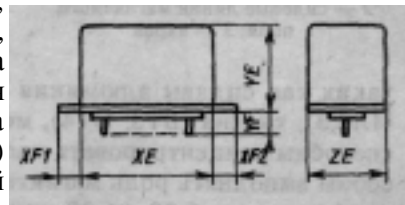


Рис. 6.18. Габаритные размеры экранированного электронного устройства

контакты, элементы закрепления экрана на объекте. Окончательные размеры находятся как

$$XG = XF1 + XE + XF2; YG = YF1 + YE + YF2; ZG = ZE,$$

где

$$XE = XT1 + XT2 + X1 + X + X2; YE = YT1 + Y1 + Y + Y2 + YT2;$$

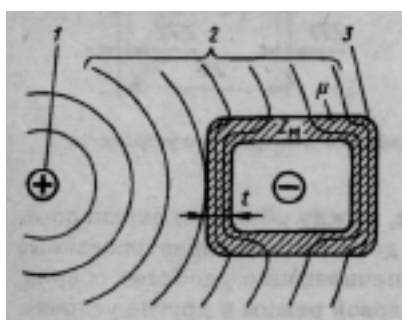
$$ZE = ZT1 + Z1 + Z + Z2 + ZT2.$$

В самом общем виде РЭС защищается от электромагнитных помех металлическим экраном в виде замкнутой оболочки. Однако в электромагнитной обстановке может наблюдаться преобладание отдельного вида поля. Поэтому при поиске оптимальной конструкции следует различать:

магнитные экраны для подавления магнитной составляющей поля помехи;

электростатические экраны для подавления электрической составляющей поля помехи;

электромагнитные экраны для подавления обоих составляющих поля помехи.



Принцип работы магнитного экрана показан на рис. 6.19. Магнитный ток от источника помехи замыкается в толще экрана и лишь частично попадает в пространство радиоэлектронного устройства. Чем больше магнитная проницаемость материала экрана, тем большая часть энергии магнитной составляющей поля будет сосредотачиваться в толще экрана. Поэтому наи-

Рис. 6.19. Принцип действия магнитного экрана:
/ — источник магнитной помехи;

большой эффективностью будут обладать конструкции, изготовленные из ферромагнетиков: железа (Fe), никеля (Ni), кобальта (Co), гадолиния (Gd). Корпуса приборов и устройств, выпол-

ненные из немагнитных материалов, таких как сплавы алюминия (АМг, АМц, Д16), магния (МА2, МЛ1, МЛ2.3), титана (ВТ3, ОТ4), меди, латуни (Л90, Л70, ЛЖС58-1-1), не способны концентрировать магнитные силовые линии и потому не способны выполнять роль магнитных экранов. Это хорошо иллюстрируют графики рис. 6.20—6.22, на которых видно, что для АМц, Д16 и ЛЖС58-1-1 затухание магнитного поля ничтожно мало по сравнению с действием экрана из карбонильного железа, технически чистого железа АРМКО, пермаллоев 79НМ, 80ХНС.

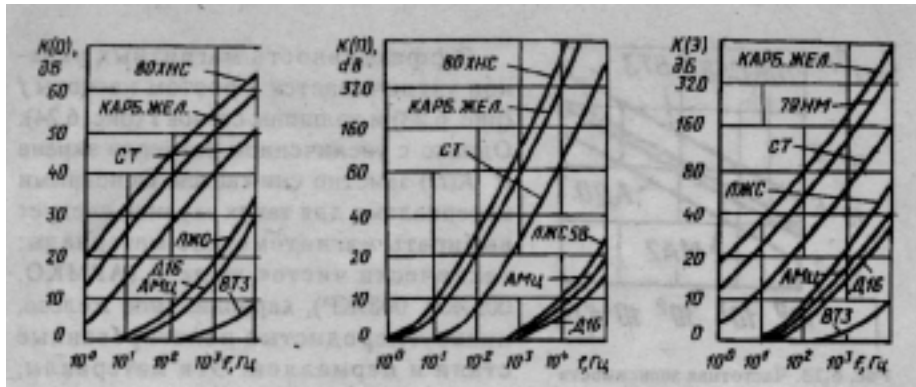


Рис. 6.20. Зависимость коэффициента отражения $K(0)$ от частоты при магнитном экранировании (толщина стенки 1 мм)

Рис. 6.21. Зависимость коэффициента поглощения $K(p)$ от частоты для магнитного экрана (толщина стенки 1 мм)

Рис. 6.22. Зависимость общего коэффициента экранирования $K(э)$ от частоты для магнитного экрана (толщина стенки 1 мм)

Суммарная эффективность экранирования $K(э)$ для различных материалов представлена на рис. 6.22. Однако вклад каждой составляющей неравнозначен. Так, на частоте $f = 10$ Гц для экрана из 80XHC ($t = 1$ мм) $K(p) = 8$ дБ, а $K(0) = 33$ дБ, на частоте 100 Гц имеем соответственно 23 и 44 дБ, а на частоте 500 Гц вклады примерно равны 58 и 52 дБ. Отсюда можно сделать вывод, что на низких частотах ($f \leq 100$ Гц) основной вклад в магнитное экранирование вносит эффект отражения, а экранирование за счет поглощения энергии помехи незначительно.

Выражение для оценки эффективности экрана

из магнитных материалов ($\mu \geq 3 \cdot 10^3$) на частотах $f \leq 100$ Гц имеет вид

$$K(H) = K(0) = 20 \lg \left\{ 1 + \frac{Z_M}{2Z_D} k_M t \right\} \quad (6.11)$$

из немагнитных материалов ($\mu = 1$; $Z_D^H / Z_M \gg 1$)

$$K(0) = 20 \lg \left\{ 1 + \frac{Z_D^H}{2Z_D} th(k_M t) \right\}$$

При $k_M t \rightarrow 0$ $K(p) \rightarrow 0$ и

$$K(H) = K(0) = 20 \lg \left\{ 1 + \frac{Z_D^H}{2Z_D} (k_M t) \right\} = 20 \lg \left\{ 1 + 4 \cdot 10^8 \frac{f R t}{r} \right\} \quad (6.12)$$

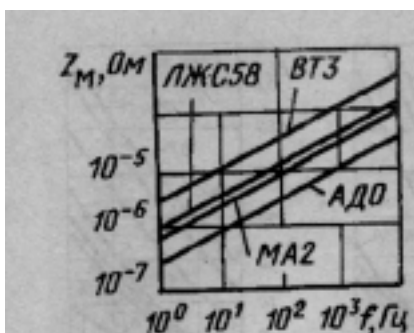


Рис. 6.23. Частотная зависимость волнового сопротивления экрана

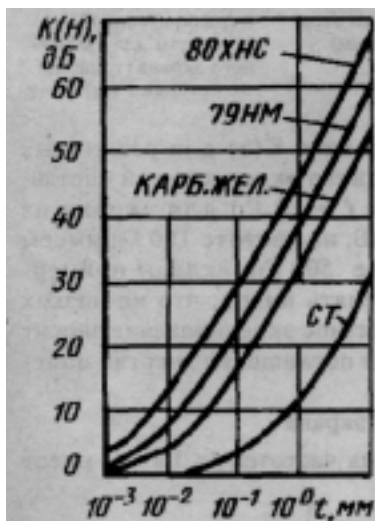


Рис. 6.24. Эффективность магнитного экрана в зависимости от толщины стенки для ферромагнитных материалов на частоте 10 кГц

Эффективность магнитных экранов увеличивается с ростом частоты/ (рис. 6.23) и толщины стенок t (рис. 6.24). Однако с увеличением размеров экрана R $K(H)$ заметно снижается. Основными материалами для таких экранов следует выбирать магнитомягкие материалы: технически чистое железо (АРМКО, 005ЖР, 008ЖР), карбонильное железо, низкоуглеродистые нелегированные стали и пермаллои. Эти материалы, имеющие требуемые магнитные свойства, удобны для изготовления экранирующих оболочек разными методами пластической деформации. Самым простым и надежным материалом следует считать технически чистое железо. Оно служит основным компонентом большинства магнитных материалов. Магнитные свойства его будут определяться количеством и составом примесей, из которых наиболее вредными являются: углерод (С), кислород (О), сера (S), водород (Н). Из электротехнических сталей для магнитных экранов подходят те, которые допускают пластическую деформацию, например 10895, ЭТ20895, ЭТ21895. Лучшими материалами для магнитных экранов следует считать железо-никелевые сплавы (пермаллои), обладающие наибольшей магнитной проницаемостью в слабых магнитных полях. С учетом пригодности к пластической деформации лучше всего применять пермаллои марок: 79НМ, 80ХНС, 50ХНС, 81НМА. Основные свойства перечисленных материалов приведены в табл. 6.1.

Магнитные экраны эффективны лишь при постоянном токе и в диапазоне низких частот. С увеличением частоты повышенная магнитная проницаемость теряет свое значение из-за вытеснения магнитного поля ближе к поверхности экрана.

Таблица 6.1

Материал	Толщина листа,	$\rho \cdot 10^{-6}$, Ом·мм	μ	ГОСТ, ТУ
Технически чистое железо	0,1 ... 3,9	100	250	ТУ14-1-1720-76
Карбонильное железо	0,1 ... 3,9	100	4000	ГОСТ 13610-79
Электротехнические нелегированные стали: 10895, 20895, 11895, 21895	0,1 ... 3,9	140	3000	ГОСТ 3836-83
Пермаллой:				
79НМ	0,005 ... 22	550 ... 620	10000 ... 25000	ГОСТ 10160-75
80ХНС	0,005	800	25000 ...	ГОСТ 10160-75

Немагнитные материалы, такие как латунь, сплавы алюминия, магния, титана, действуют как электромагнитные экраны. Поэтому их эффективность при защите от магнитных полей очень мала, что подтверждают графики рис. 6.25.

Электростатические экраны с целью уменьшения потенциала вторичной помехи целесообразно изготавливать из материалов с высокой проводимостью. Такими конструкционными материалами, прежде всего, служат двойные латуни (Л70, Л80, Л85, Л90), деформируемые алюминиевые сплавы АД0, АД1, АМц. Если экран изготавливается путем механической обработки (резание, точение, фрезерование), то более удобны свинцовистые латуни ЛС63-1, ЛС74-3, ЛС64-2, дурали Д16, В95.

Эффективность электростатического экрана оценивается по формуле

$$K(E) = 20 \lg \left\{ 1 + \frac{Z_D^E}{2Z_M} (k_M t) \right\} = 20 \lg \left\{ 1 + \frac{1.11 \cdot 10^{12} t}{frR} \right\}$$

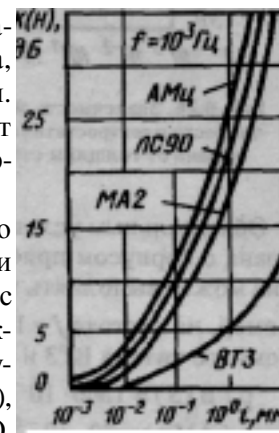


Рис. 6.25. Эффективность магнитных экранов из немагнитных материалов на частоте 10 кГц

Экранирующий эффект конструкционных материалов корпусов радиоаппаратуры, рассчитанный по этой формуле, представлен на графиках рис. 6.26 и 6.27 для $R = 50$ мм. Из графиков видно, что при $f \rightarrow 0$ экранирующий эффект стремится к бесконечности, но с ростом частоты снижается. Причина заложена в частотной зависимости волнового сопротивления пространства электрической составляющей поля:

$$Z_{д}^E = (\omega \epsilon_0 R)^{-1}. \quad (6.14)$$

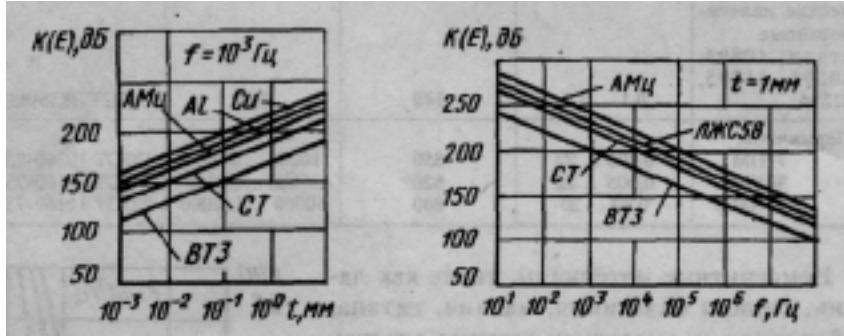


Рис. 6.26. Зависимость эффективности электростатического экрана от толщины стенки

Рис. 6.27. Зависимость эффективности электростатического экрана от частоты

Обязательным условием такого экранирования является соединение экрана с корпусом прибора или землей. Роль электростатического экрана может выполнять металл с любым удельным сопротивлением. Например, на частоте $f = 10^4$ Гц эффективность экранирования для высокоомного титана ВТЗ и низкоомного АМц будет равна:

$$\rho(\text{ВТЗ}) = 1360 \cdot 10^{-6} \text{ Ом мм}, K(E) = 180 \text{ дБ},$$

$$\rho(\text{АМц}) = 30 \cdot 10^{-6} \text{ Ом мм}, K(E) = 210 \text{ дБ}.$$

Относительное изменение эффективности экранирования и удельного сопротивления составит:

$$\Delta K(E)/K(E) = (210-180)/210 = 14\%,$$

$$\rho(\text{ВТЗ})/\rho(\text{АМц}) = 1360 \cdot 10^{-6} / 30 \cdot 10^{-6} = 45,3\%.$$

Нет особых требований и к толщине экрана. Из рис. 6.30 находим

$$K(E)_{\text{Al}} = 220 \text{ дБ} \quad \text{для } t = 10 \text{ мм},$$

$$K(E)_{\text{Al}} = 160 \text{ дБ} \quad \text{для } t = 1 \text{ мм}.$$

Относительное изменение $\Delta K(E) / K(E) = (220 - 160) / 220 = 27,2\%$
 хотя толщина стенки изменилась в 10^4 раз.

Отсюда следует, что при конструировании электростатических экранов марка материала и его толщина выбираются исходя из удобств изготовления, коррозионной стойкости, механической прочности. В табл. 6.2 приведены основные электрические характеристики конструкционных материалов для РЭС и их металлические покрытия.

Таблица 6.2

Материал экрана	$\rho \cdot 10^6$, Ом	μ	Материал покрытия	$\rho \cdot 10^6$, Ом мм	μ
Ст 10	120	100	Серебро	15	1
АМц	30	1	Алюмини	26	1
Д16	47,6	1	Медь	17	1
АЛ4	46,8	1	Никель	68	59.. 530
АЛ9	45,7	1	Хром	130	1
МА2	120	1	Кадмий	74	1
ВТЗ	1360	1	Цинк	59	1
Л90	45	1	Олово	113	1
Л68	72	1	Золото	22,5	1
ЛЖС58-1-1	70	1	Палладий	108	1

Пример 6.1. Определить размеры электростатического экрана для функционального узла на печатной плате с размерами 120x80x20 мм. Ослабление помехи на частоте 100 кГц не менее 120 дБ.

Выберем зазоры между печатной платой и экраном согласно обозначениям рис. 6.21: $XI = X2 = Y2 = 5$ мм, $Y1 = 15$ мм для установки разъема. Размеры экрана составят: $XE = 120 + 5 + 5 = 130$ мм, $YE = 80 + 5 + 15 = 100$ мм, $ZE = 20 + 5 + 5 = 30$ мм, откуда $R = \max \{AE, YE, ZE\} = 130$ мм.

Толщину экрана XT находим из формулы (6.13) после ее преобразования: $t = 1,11 \cdot 10^{-12} \cdot K(E) f \rho R$.

В качестве материала выбираем латунь Л68:

$$XT = 1,11 \cdot 10^{-12} \cdot 10^6 \cdot 10^5 \cdot 72 \cdot 10^{-6} \cdot 130 = 1,04 \cdot 10^{-3} \text{ мм} \approx 1 \text{ мкм.}$$

Из условий механической прочности, жесткости и технологии пластической деформации толщину стенки выбираем равной 0,4...0,5 мм.

Рассмотрим расчет конструкций *электромагнитных экранов*. Как следует из рассмотренных принципов конструирования электростатических и магнитных экранов, их работа основана на замыкании энергии соответствующих полей в материале экрана вследствие лучшей электропроводности или магнитопроводности материала по сравнению с окружающей средой.

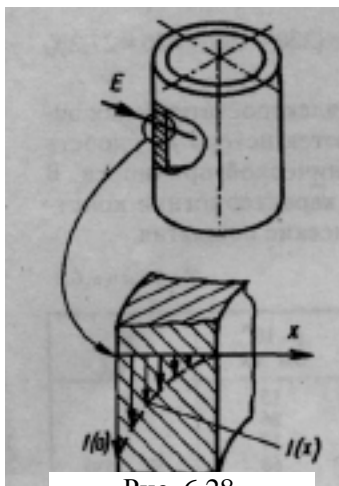


Рис. 6.28.

Поглощение
электромагнитной
помехи за счет
скин-эффекта

Такой способ экранирования пригоден и оправдан в области только низких частот. С ростом частоты растет величина вихревых токов в материале, наведенных полем помехи. Энергия помехи, достигая поверхности экрана, вызывает появление этих токов. Глубина проникновения токов наводки в стенку экрана зависит от частоты из-за явления поверхностного эффекта. По этим причинам величина высокочастотного тока изменяется по сечению стенки по закону, который для однородного материала можно считать экспоненциальным (рис. 6.28):

$$I(x) = I(0) \cdot \exp\{-\alpha x\}, \quad (6.15)$$

где $I(x)$ — амплитуда тока помехи на расстоянии x от поверхности экрана; $I(0)$ — амплитуда тока помехи на наружной поверхности экрана; α — коэффициент вихревых токов: $\alpha = [0,5\omega\mu_a/\rho]^{1/2}$, где $\mu_a = \mu_0\mu$, $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-8}$ Гн/см — магнитная проницаемость вакуума; μ — относительная магнитная проницаемость. Выполним преобразование: $I(0)/I(x) = \exp\{\alpha x\}$.

Если $I(0)/I(x) = e$, то

$$x = 1/\alpha. \quad (6.16)$$

Толщина стенки экрана x , на которой ток наводки ослабляется в e раз, носит название скин-слоя, где e — основание натурального логарифма. Толщина скин-слоя находится по формуле

$$\delta = x[I(0)/I(x) = e] = 1/\alpha \text{ Ом} \cdot \text{м}^2/\text{м}. \quad (6.17)$$

Если выбрать единицы измерения f — в МГц, ρ — в Ом \cdot мм²/м, то для магнитных материалов ($\mu \gg 1$), таких как сталь, пермаллой, ферриты, формула приобретает вид

$$\delta \approx 0,5 [\rho/(f\mu)]^{1/2} \text{ мм}. \quad (6.18)$$

Для немагнитных материалов (Al, Cu, Mg) $\mu = 1$, и

$$\delta \approx 0,5 [\rho/f]^{1/2} \text{ мм}. \quad (6.19)$$

Задаваясь величиной ослабления помехи $K(\varepsilon)$, можно по величине скин-слоя определить минимальную толщину стенки электромагнитного экрана:

$$t = \ln K[\varepsilon] / \delta \quad (6.20)$$

В соответствии с энергетическими принципами [32, 33] коэффициент электромагнитного экранирования $K(\varepsilon)$ можно представить в виде совокупности двух составляющих: составляющей коэффициента экранирования за счет коэффициента отражения $K(\rho)$ и составляющей экранирования за счет поглощения в материале экрана $K(\pi)$. Анализ вклада каждой составляющей в суммарный коэффициент можно сделать на основании графиков рис. 6.29:

1. Наибольший коэффициент электромагнитного экранирования достигается для материалов с волновым сопротивлением минимальной величины Z_m . Поэтому при выборе материала следует соблюдать условие $Z_d \gg Z_m$, где $Z_d = 377$ Ом.

2. На частотах больше 1 МГц резко увеличивается вклад поглощения помехи за счет скин-эффекта, который, в свою очередь, для материалов с меньшим удельным сопротивлением усиливается.

3. Тонкие проводящие пленки толщиной до 0,1 мм обеспечивают достаточно высокое и постоянное ослабление помехи в широком диапазоне частот $f < 100$ МГц.

Низкий уровень Z_m обеспечивается материалами, имеющими в своем составе высокое содержание алюминия, меди, серебра, золота, бериллия, марганца, т.е. металлов с удельным сопротивлением $\rho \leq 50 \cdot 10^{-6}$ Ом \cdot мм. В общем случае толщина стенки экрана, обеспечивающая необходимую механическую прочность и жесткость конструкции, вполне достаточна для значительного подавления помехи от электромагнитной волны для $K(\varepsilon) = 100 \dots 200$ дБ. Нетрудно видеть из графиков на рис. 6.30—6.32, что обычная алюминиевая, медная, латунная фольга толщиной 20...30 мкм обеспечивает высокую степень экранирования уже на частоте 100 кГц. В случае применения литых пластмассовых корпусов такую фольгу можно наклеивать на стенки специ-

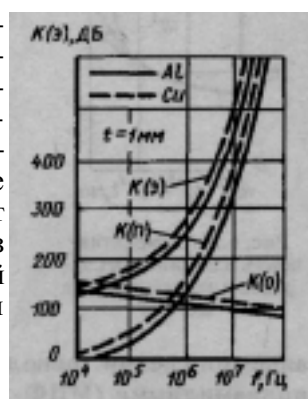


Рис. 6.29. Эффективность медного и алюминиевого покрытий при экранировании в зависимости

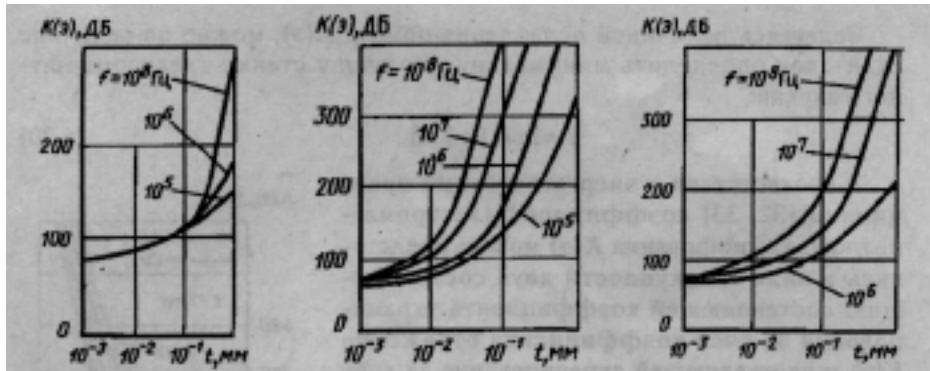


Рис. 6.30. Эффективность алюминиевых экранов в зависимости от частоты

Рис. 6.31. Эффективность экранов из АРМКО в зависимости от частоты

Рис. 6.32. Эффективность экранов из латуни ЛЖС58-1-1 в зависимости от частоты

альными клеями: фенольными (БФ, ВК), эпоксидными (ЭД, ВК-7, Л-4), полиамидными (МПФ-1), перхлорвиниловыми (ХВС22А, Д10, М-10). Другой способ экранирования пластмассовых корпусов РЭС заключается в нанесении на них тонких проводящих пленок. Так, с помощью вакуумного напыления можно нанести слой меди или алюминия до 4...5 мкм. Можно также использовать химическое осаждение меди. Реальный экран нельзя сделать абсолютно замкнутой металлической оболочкой. Так, для соединения с внешними цепями необходимы отверстия, чтобы вывести проводники. Для размещения электронного устройства экран необходимо делать разъемным. При соединении разъемных частей возможно появление щелей. Щели также могут появиться при неудачной пайке, сварке. Для отвода тепла с помощью естественной и принудительной конвекции конструктор вынужден предусмотреть отверстия. В результате на поверхности экрана неизбежно наличие

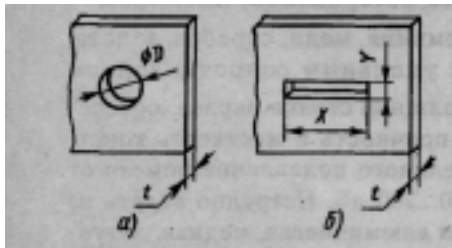


Рис. 6.33. Типичные отверстия в экране: а — круглое отверстие; б — прямоугольная щель

различия отверстий различных форм и размеров, которые, естественно, вызовут снижение экранирующих свойств конструкции. Необходимо свести к минимуму эти нежелательные явления.

Типичными формами отверстий в экране можно считать прямоугольную щель с размерами X и Y (рис. 6.33, б) и круглое отверстие диаметром D (рис. 6.33, а). При наличии прямо-

угольной щели эффективность электрически негерметичных экранов можно подсчитать по формуле

$$K(\vartheta) = -20 \lg \left(4.16 \frac{\sqrt{XY}}{l} \right) + 27.3 \frac{t}{X} \text{ дБ}, l \gg 2X$$

(6.21)

Для вентиляции и установки индикаторов и органов регулировки в экране делаются круглые отверстия. В этом случае эффективность экрана вычисляется по формуле

$$K(\vartheta) = -20 \lg(3.3D/\lambda) + 32t/D, \text{ дБ}; \lambda \gg \pi D \quad (6.22)$$

Появление отверстий в экране не окажет значительного влияния, если $X \leq 0,05 \lambda$.

7. КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

7.1. Особенности конструирования электрических соединений

Конструкция электрических соединений в значительной степени определяет качество и надежность конструкции РЭС. Искажение, затухание и задержка сигнала в электрической линии связи, а также помехи могут нарушить нормальное функционирование РЭС: вызвать сбой цифрового или изменить параметры аналогового изделия. Кроме того, методы монтажа [34, 35] влияют на массогабаритные показатели РЭС. От монтажа фактически зависят в настоящее время трудоемкость и стоимость изделий: только операции сборки составляют 50...70% от об-

щей трудоемкости изделий; в результате монтажа чаще всего возникает потребность в использовании драгоценных металлов, а также таких остродефицитных материалов, как вольфрам, ковар и др. Нельзя также забывать, что надежность РЭС во многом определяется числом сварных и паяных соединений, т.е. процессом монтажа.

Развитие методов монтажа оказывает существенное влияние на конструктивное исполнение устройств РЭС; в свою очередь, методы монтажа в значительной мере зависят от назначения РЭС.

Поиск оптимального конкретного конструктивно-технологического варианта должен проводиться с учетом элементной базы и техники монтажа. В соответствии с ТЗ на конкретный вид РЭС должны быть последовательно рассмотрены следующие вопросы, связанные с процессами монтажа: общая компоновка, компоновочная совместимость принятой элементной базы и межсоединений; обеспечение защиты изделий от дестабилизирующих факторов, обеспечение технологичности, удобства эксплуатации и ремонта.

К основным этапам конструирования электрических соединений, удовлетворяющих требованиям ЭМС, относятся:

расчет электрофизических параметров линий связи;

построение математических моделей линий, плат, элементной базы, узлов и изделий в целом, пригодных для анализа их работы на ЭВМ;

оценка помехозащищенности узлов с помощью расчета помех в линиях связи коммутационных плат и межблочных соединениях и сопоставление ее с допустимой.

При расчете параметров линий связи исходят из квазистатистического приближения, что позволяет существенно упростить решаемую задачу, сводя ее к статическому режиму. При этом применяется наиболее общая модель элементарного отрезка линии, состоящая из последовательно соединенных индуктивности L и активного сопротивления R и параллельно включенных емкости C и проводимости a (табл. 7.1, п. 1). При использовании диэлектриков в составе линии с очень малой проводимостью ($\sigma \approx 0$) модель упрощается (табл. 7.1, п. 2), и для большинства случаев рассматриваются линии без потерь (табл. 7.1, п. 3), для которых активное сопротивление пренебрежимо мало по сравнению с индуктивным. При проектировании линии связи можно характеризовать физическими параметрами: волновым сопротивлением Z , коэффициентом распространения волны в линии γ , коэффициентом фазы β , коэффициентом затухания α , фазовой скоростью V^\wedge , удельным временем задержки распространения сигнала $t'_z = 1/V_\phi$. Модели элементарных звеньев линии связи и их параметры представлены в табл. 7.1.

При анализе внутриаппаратурной ЭМС полезными оказываются некоторые фундаментальные соотношения между электрическими параметрами линий связи без потерь, справедливые при квазистатическом приближении [33]. Эти соотношения приведены в табл. 7.2.

Недостаточное внимание, уделяемое вопросам искажения сигналов в линиях связи, приводит к неполному использованию скоростных возможностей электронных логических элементов и вносит ненадежность в работу аппаратуры за счет появления ложных сигналов (помех).

7.2. Помехи и связи между элементами в РЭС

Помехой для РЭС является внешнее или внутреннее воздействие, приводящее к искажению информации во время ее хранения, преобразования, обработки или передачи.

Существует большое число различного рода помех, которые могут быть классифицированы по причине наведения, характеру проявления и пути распространения (рис. 7.1). Характерными особенностями помех

Таблица 7.1

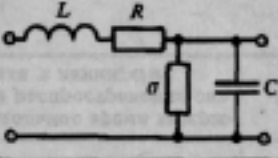
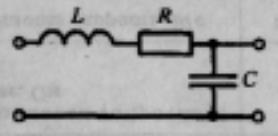
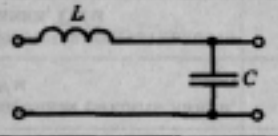
№ п/п	Схема замещения элементарного отрезка	Параметр линии связи				Примечание
		$\gamma = \alpha + j\beta$	α	β	Z	
1		$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(\sigma + j\omega C)} =$ $= \sqrt{\frac{C}{L}} \frac{R}{2} + \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{\sigma}{2} + j\omega \sqrt{LC}$	$\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} +$ $+ \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$	$\omega \sqrt{LC}$	$\sqrt{\frac{R + j\omega L}{\sigma + j\omega C}}$	Общая модель. На практике можно использовать модели 2 и 3 (ниже)
2		$\sqrt{(R + j\omega L)j\omega C}$ $(\sigma \ll j\omega C)$	$\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$	$\omega \sqrt{LC}$	$\frac{\sqrt{R + j\omega L}}{j\omega C} =$ $= \sqrt{\frac{L}{C}} \left(1 - j \frac{R}{2\omega L} \right)$	Линия с малыми последовательными потерями. Соединения в микроэлектронике
3		\sqrt{LC} $(R \ll j\omega L; \sigma \ll j\omega C)$	0	$\omega \sqrt{LC}$	$\sqrt{\frac{L}{C}}$	Линия без потерь. Для широкого класса электрических соединений

Таблица 7.2

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Расчетная формула			Примечание
			Основная	Через базовый параметр	Через ϵ_t	
1	Погонная емкость линии, Ф/м	C	—	—	$C_0 \epsilon_{гэф}$	<p>Диэлектрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м</p> <p>Магнитная постоянная $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м</p> <p>Скорость света в вакууме $V_c = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon_0}} = 3 \cdot 10^8$ м/с</p> <p>Эффективная относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{гэф} = C/C_0$</p>
2	Погонная индуктивность линии, Гн/м	L	—	$1/V_c^2 C_0$	—	
3	Волновое сопротивление, Ом	Z	$\sqrt{L/C}$	$1/V_c \sqrt{C_0 C}$	$\frac{1}{V_c C_0 \sqrt{\epsilon_{гэф}}}$	
4	Фазовая скорость, м/с	V_ϕ	$V_c \sqrt{L/C}$	$V_c \sqrt{C_0 C}$	$\frac{V_c}{\sqrt{\epsilon_{гэф}}}$	
5	Удельное время задержки распространения сигнала в линии, с/и	t'_z	$\sqrt{L/C}$	$\frac{1}{V_c} \sqrt{C_0 C}$	$\frac{1}{V_c} \sqrt{\epsilon_{гэф}}$	

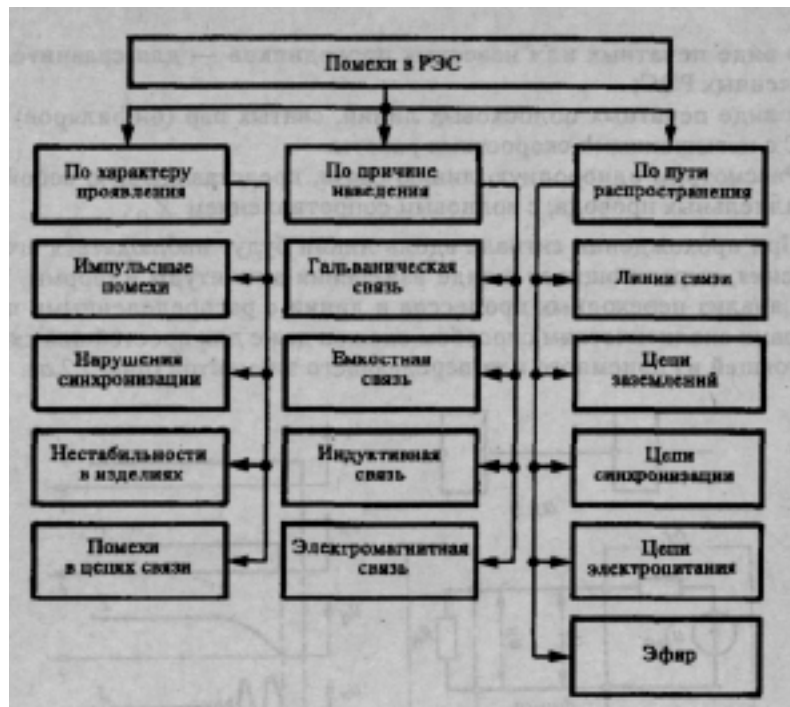


Рис. 7.1. Классификация помех в РЭС

в линиях связи являются относительно малая длительность и большая интенсивность. Существенное отрицательное воздействие оказывают также и менее интенсивные, но более длительные возмущения.

Основные причины, вызывающие искажения сигналов при прохождении их по линиям связи РЭС, следующие:

- искажение формы сигнала при прохождении по цепям связи;
- отражения от несогласованных нагрузок и неоднородностей;
- поперечные наводки из-за наличия паразитной связи между соседними цепями;
- паразитные связи по цепям питания и земли;
- наводки от внешних электрических, магнитных и электромагнитных полей.

Степень влияния каждого из перечисленных факторов на искажение сигналов зависит от характеристики линий связи, логических элементов и сигналов.

Связи между элементами в РЭС можно выполнить различными способами:

в виде печатных или навесных проводников — для сравнительно медленных РЭС;

в виде печатных полосковых линий, свитых пар (бифиляров) — в РЭС с повышенными скоростями работы.

Рассмотрим однородную линию связи, представляющую собой два параллельных провода, с волновым сопротивлением Z_0 .

При прохождении сигнала вдоль линии будут наблюдаться его искажения, выражающиеся в виде изменения амплитуды и формы. Точный анализ переходных процессов в линии с распределенными параметрами аналитическим способом сложен даже для простейшей схемы, состоящей из приемного или передающего элементов (рис. 7.2,а).

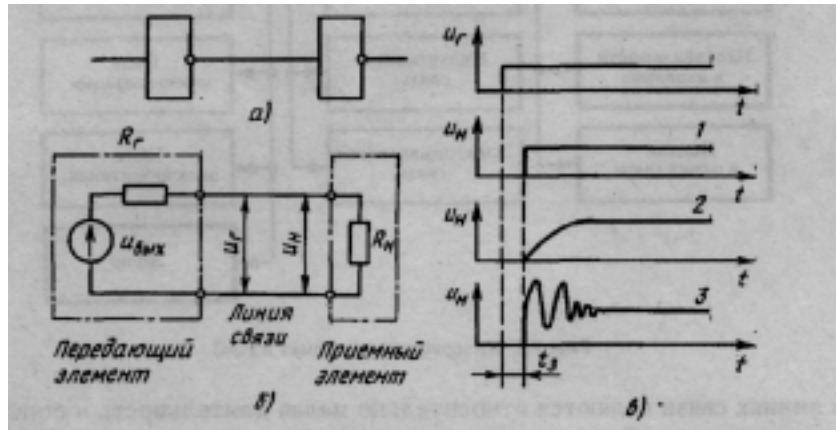


Рис. 7.2. Принципиальная (а), эквивалентная (б) схемы связи двух элементов

и графики переходных процессов (в) в согласованной линии связи:

- 1 — R_r и $R_n = Z_0$;
- 2 — R_r и $R_n > Z_0$ или $R_r < Z_0$ и $R_n < Z_0$;
- 3 — $R_r > Z_0$, $R_n < Z_0$ или $R_r < Z_0$, $R_n > Z_0$

При анализе переходных процессов передающий элемент моделируется источником напряжения $u_{\text{вых}}$ с последовательно подключенным сопротивлением R_r , приемный — сопротивлением R_n (рис. 7.2, б).

Минимальные искажения сигнала, выраженные в задержке на вели-

$t_3 = \frac{l}{V\phi}$ чину (где l — длина линии, $V\phi$ — фазовая скорость электромагнитной волны), и некоторое уменьшение

амплитуды сигнала до

$U_n = \frac{R_n}{R_r + R_n}$ будут иметь место в режиме согласованной линии (кривая

I на рис. 7.2, в), когда волновое сопротивление Z_Q линии совпадает с R_H и R_T приемного и передающего элементов.

В режиме несогласованной линии (кривые 2, 3 на рис. 7.2, в) наиболее опасен случай колебательного переходного процесса, приводящий к многократным переключениям схемы на выходе линии. Режим несогласованной линии (кривая 2, рис. 7.2, в) приводит к затягиванию фронта и, как следствие, некоторому понижению быстродействия. Однако на практике исключить появление колебаний в линиях крайне трудно и, прежде всего, из-за изменения значений R_T или R_H при подсоединении к выходу и входу линии в каждом конкретном случае разного количества элементов, а также из-за наличия внутренних неоднородностей линии вследствие ее изгибов, изменения геометрических размеров и характеристик диэлектрика по длине и т.д., что приводит к отклонению волнового сопротивления линии от номинального значения.

Критерием проектирования линий связи является допустимая задержка или уменьшение уровня импульсного сигнала не ниже допустимого.

При разукрупнении схемы РЭС на подсхемы разных уровней сложности все линии связи целесообразно выделить в подгруппы коротких и длинных линий. Линии связи, соответствующие отношению $t_{\phi}/t_3 \leq 2$, относятся к длинным, а соответствующие отношению

$t_{\phi}/t_3 > 2$ — к коротким, где t_{ϕ} — время фронта импульса генератора

[36]. Длинная линия связи характеризуется временем распространения сигнала, много большим фронта импульса. В этой линии отраженный от конца линии сигнал приходит к ее началу после окончания фронта импульса и искажает его форму. Короткая линия связи характеризуется временем распространения сигнала, много меньшим значения переднего фронта, передаваемого по линии импульса. Свойства такой линии можно описать сосредоточенными сопротивлением, емкостью и индуктивностью. В пределах конструктивов I уровня модули связи, как правило, короткие. Соединения внутри конструктивов II, III уровней в основном длинные. При прохождении импульсных сигналов по коротким линиям на приемном конце линии появляется «звон» на фронтах (рис. 7.2, в). Когда амплитуда «звона» значительна, а частота колебаний соизмерима с частотой переключения логических элементов, то возможны ложные срабатывания. Максимальную длину несогласованной короткой линии связи, в которой амплитуда «звона» не будет превышать 15% перепада, передаваемого по линии импульсного сигнала, можно определить по формуле $l_{\max} < t_{\phi} C/2$. Задержку распределения сигнала получаем по формуле $t_3 = \sqrt{LC}$ (см. табл. 7.2).

На задержку сигнала в коротких линиях влияют такие конструктивные параметры, как длина линии, расстояние до «земли», нагрузка на выходе линии. Короткие линии не имеют стабильного волнового сопротивления и выполняются печатными проводниками, одиночными объемными проводниками, витой парой, жгутом.

При передаче сигналов по несогласованным длинным линиям возможны многократные отражения сигнала и вследствие этого значительное возрастание времени переходного процесса, что приводит к недоиспользованию серии микросхем по быстродействию.

Рассмотрим конструктивные способы согласования. Согласование выполняется применением конструкций связи с высокой стабильностью волнового сопротивления и введением в качестве согласующих элементов резисторов, эмиттерных повторителей (рис. 7.3, а, б, в).

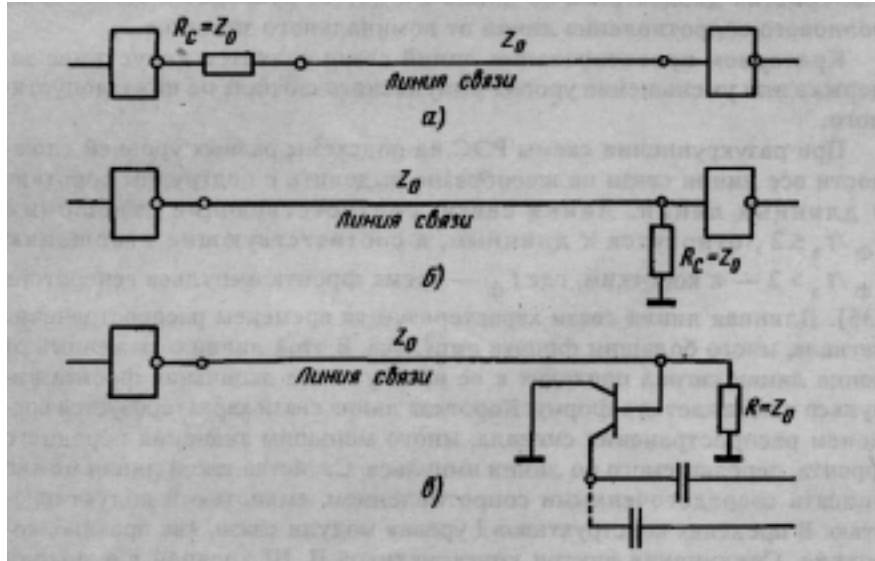


Рис. 7.3. Способы согласования линий связи сопротивлением: а — последовательным; б — параллельным; в — с помощью эмиттерного повторителя

Линия связи будет согласованной, если сопротивление приемного или передающего конца линии равно ее волновому сопротивлению; для цифровых схем рассогласование на 10% является вполне приемлемым.

Подключение согласующего резистора R_c последовательно с выходом передающего элемента (последовательное согласование) используется, если выходное сопротивление элемента много меньше Z_0 .

В параллельно согласованной линии согласующий резистор $-R_c$ подсоединяется параллельно входному сопротивлению приемного элемента. Способ согласования применяется, если Z_0 во много раз меньше входного сопротивления нагруженного на линию электронного элемента.

Поскольку падение напряжения на резисторах понижает уровень передаваемого сигнала, режимы последовательного и параллельного согласований применяются, когда число приемных электронных схем не превышает двух. При числе нагрузок на линию больше двух применяются согласующие эмиттерные повторители (см. рис. 7.3, в). Для уменьшения рассогласования база и коллектор должны коммутироваться к линии проводниками меньшей длины.

В качестве длинных линий используются коаксиальный кабель, витая пара, ленточные кабели.

7.3. Помехи при соединении элементов РЭС короткими линиями связи

При анализе процессов передачи сигналов короткую линию связи можно представить в виде эквивалентной схемы, содержащей сосредоточенные индуктивность и емкость (омическим сопротивлением пренебрегают). В зависимости от геометрических размеров сечений линий, их длины, диэлектрических свойств изоляционных материалов тот или иной параметр линии может оказывать большее воздействие на процессы передачи сигнала, чем все остальные.

Рассмотрим наводимую емкостную и взаимдуктивную помехи на участке l , на котором параллельно друг другу на расстоянии d располагаются две цепи, имеющие взаимные емкость C_{12} и индуктивность M_{12} (рис. 7.4, а) и выполненные по печатной технологии. Для этого предположим, что в первом случае цепь (источник помех) нагружена на источник напряжения u , а во втором случае — на источник тока I . Взаимные емкость и индуктивность печатных проводников соответственно определяются по формулам:

$$C_{12} = 0,12 \cdot 10^{-12} \varepsilon_l l / \lg[2d/(a + d)],$$

где ε_2 — диэлектрическая проницаемость среды;

$$M_{12} = 2l \{2,3 \lg[2l/(d + b)] + (d + b)/l\} \cdot 10^{-8}.$$

В случае наибольшего влияния емкостной связи между сигнальными цепями ($M \approx 0$) в соответствии с эквивалентной схемой (рис. 7.4, б)

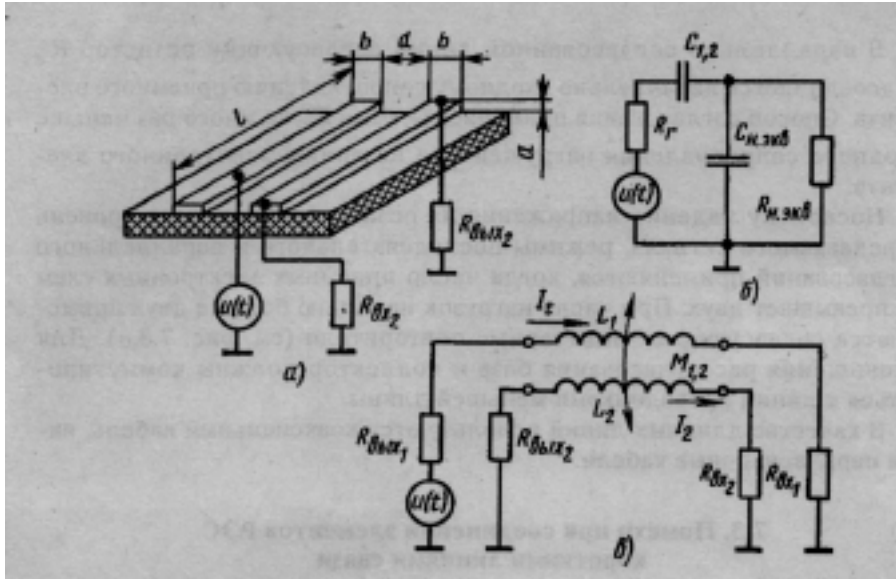


Рис. 7.4. Паразитные связи между короткими линиями связи: *a* — общая схема; *б* — эквивалентная схема емкостной связи; *в* — эквивалентная схема индуктивной связи

при прохождении по линии-индуктору сигнала амплитудой u и фронтом нарастания t_ϕ уравнение для расчета максимальной наводимой помехи имеет вид [36]

$$u_{ном} = \frac{u C_{12} R_{н.э.к.в.}}{t_\phi} (1 - e^{-t_\phi / T})$$

где $R_{н.э.к.в.} = R_{вх2} R_{вых2} / (R_{вх2} + R_{вых2})$; $T = C_{12} R_{н.э.к.в.}$

Поскольку $t_\phi \gg T$ и $R_{вх} \gg R_{вых}$ получим $u_{ном} \approx u R_{вых} C_{12} / t_\phi$.

Для выполнения условия надежной работы элемента необходимо, чтобы

$$u_{ном} < u_{ном. доп} \text{ или } C_{12} < t_\phi k_{пом} / R_{вых} \quad (7.1)$$

где $k_{пом} = u_{ном. доп} / u$ — коэффициент помехоустойчивости элемента.

Подставив в (7.1) выражение для расчета емкости связи и решив его относительно параметра l , найдем допустимую длину общего участка l_c

$$l_c < \frac{t_\phi k_{пом} \lg 2d / (a + b)}{0.12 e_r R_{ВЫХ}} 10^{12}$$

Неравенство (7.2) определяет условия надежной работы элементов РЭС. Для его выполнения необходимо уменьшать выходное сопротивление, длину связей и их сечения, увеличивать фронт импульсов и коэффициент помехоустойчивости элементов, расстояние между линиями связи, применять изоляционные материалы с хорошими диэлектрическими свойствами.

В случае преобладающего влияния взаимной индуктивной связи между сигнальными цепями необходимо учитывать значение и фронт импульса тока, протекающего по цепи — источнику помех. ЭДС, наведенная на другой цепи связи (рис. 7.4, в),

$$u_{ном} = M_{12}I/t_{\phi}$$

Так как $R_{ВЫХ} \ll R_{ВХ}$, то это напряжение практически полностью будет приложено к сопротивлению $R_{ВХ}$, и воспринято как помеха. По аналогии с (7.2) условие надежной работы элемента имеет вид

$$u_{ном} < u_{ном.дон} \text{ или } M_{12} < u_{нт\phi}/I \quad (7.3)$$

где $u_{п}$ — порог срабатывания элемента.

Подставив в (7.3) выражение для расчета взаимной индуктивности между проводниками и решив его относительно параметра l , найдем допустимую длину общего участка связей

$$2l\{2,31g[2l/(d+b)] + (d+b)/l\} \cdot 10^{-8} < u_{нт\phi}. \quad (7.4)$$

Неравенство (7.4) определяет условия надежной работы элементов РЭС. Для его выполнения необходимо уменьшить длину цепей связи, амплитуду токов, увеличить порог срабатывания элементов, фронт передаваемых импульсов, расстояние между проводниками связей.

7.4. Помехи при соединении элементов РЭС длинными линиями связи

Длинную линию связи при расчетах схем рассматривают как однородную линию с распределенной емкостью C_0 и индуктивностью L_0 . Переходные процессы в таких линиях зависят от характера перепада напряжения $u_{вх}$ на входе линии и соотношения волнового сопротивления линии Z_0 , выходного сопротивления R_r генератора импульсов и входного сопротивления R_n , нагруженного на конец линии элемента (см. рис. 7.2, б).

Для анализа переходных процессов в длинных линиях связи необходимо знать их волновое сопротивление Z_0 . При нахождении Z_0 используют метод, заключающийся в определении погонной емкости C_0 линии связи, связанной с ее волновым сопротивлением соотношением

$$Z_0 = 1 / (v_0 C_0).$$

Здесь v_0 — скорость распространения волны вдоль линии:

$$v_0 = 1 / \sqrt{\mu \epsilon} = 3 \cdot 10^8 / \sqrt{\mu_r \epsilon_r}, \text{ где } \mu_r - \text{ магнитная проницаемость среды; } \epsilon_r - \text{ диэлектрическая проницаемость среды.}$$

Для большинства диэлектриков $\mu_r = 1$, поэтому

$$Z_0 = \sqrt{\epsilon_r} / (3 \cdot 10^8 C_0) \quad (7.5)$$

Емкость между проводниками, образующими линию связи, определяется как отношение заряда на любом из них к разности потенциалов ϕ , т.е. погонная емкость

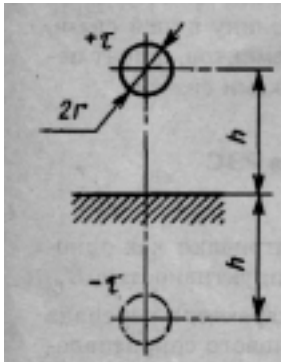
$$C_0 = \frac{q}{j} \quad (7.6)$$

где q — заряд на единицу длины проводника.

Потенциал, создаваемый линейным зарядом с плотностью q в точке на расстоянии r от него, равен

$$\phi = [q / (2 \pi \epsilon)] \ln (1/r) + \text{const.}$$

При определении емкости проводников используют метод зеркальных изображений. При расчете потенциала по этому методу учитывают заряды основных проводников и фиктивных, являющихся зеркальным изображением основных относительно поверхности раздела «диэлектрик — проводящая плоскость». Заряд фиктивного проводника при этом берется обратным по отношению к основному.



Рассмотрим определение Z_0 линии связи, образованной тонким проводником круглого сечения радиусом r , расположенным над проводящей плоскостью на расстоянии h (рис. 7.5).

Потенциал в любой точке на плоскости, соответствующей проводящей поверхности, создаваемый системой зарядов основного и фиктивного проводников, равен нулю, и используемая разность потенциалов равна

$$\phi = [q / (2 \pi \epsilon \epsilon_0)] [\ln (1/r) + \ln 2 h].$$

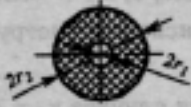
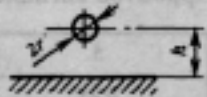

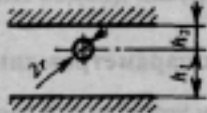
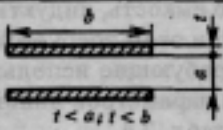
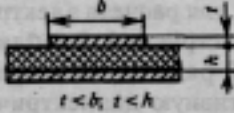
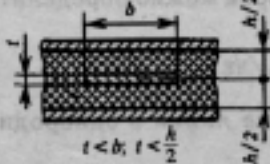
Рис. 7.5.
Определение волнового сопротивления длинной линии связи

Отсюда, учитывая (7.5) и (7.6), находим

$$Z_0 = (60/\sqrt{\epsilon_r}) \ln(2h/r) \quad (7.7)$$

выражение (7.7) действительно для $h \gg r$ (тонкий провод). При $h/r \geq 2$ оно дает 5%-ю ошибку, при $h/r \geq 3$ — ошибку в 1,5%, а $h/r \geq 5$ — лишь в 0,5%.

Таблица 7.3

№ п/п	Сечение	Z_0
1		$\frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{r_2}{r_1}$
2		$\frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{h + \sqrt{h^2 - r^2}}{r}$
3		$\frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{2h \sqrt{1 + 4h^2/d^2}}{r}$
4		$\frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left[\frac{2(h_1 + h_2)}{\pi r} \sin \frac{\pi h_1}{h_1 + h_2} \right]$
5		$\frac{120 a}{\sqrt{\epsilon_r} b}$
6		$\frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{1,75 h}{b}$
7		$\frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{2,55 h}{b}$

При $h/r > 1$ более точный результат получают из выражения

$$Z_0 = (60/\sqrt{\epsilon_r}) \ln(h + \sqrt{h^2 - r^2})/r$$

В табл. 7.3 приведены формулы для расчета волнового сопротивления связи различной конфигурации.

Максимально допустимая длина несогласованной линии связи может быть оценена по формуле

$$l_{max} = (t_\phi/k_c)(v_0/\sqrt{\epsilon_r}).$$

где t_ϕ — длительность фронта сигнала, с; k_c — эмпирическая постоянная, числовое значение которой зависит от конструкции схемы и линии связи ($k_c = 3 \dots 5$).

Для наиболее часто встречающихся случаев $v_0 = 2 \cdot 10^8$ м/с, $k_c = 4$. Значения l_{max} для разных значений фронтов сигналов:

$t_\phi, \text{нс}$	30	5	1
$l_{max}, \text{М}$	1,5	0,25	0,05

Конструктивные способы согласования несогласованных длинных линий изложены в разд. 7.2. Одним из эффективных способов уменьшения помех при соединении элементов РЭС длинными линиями связи является применение в качестве нагрузки диодов Шотки.

7.5. Расчет электрических параметров линий связи




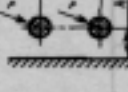
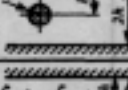
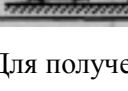
Для расчета электрических параметров линий связи [33] достаточно уметь рассчитывать электрическую емкость, индуктивность или волновое сопротивление линии связи. При этом требуется применять достаточно сложные методы расчета, требующие использования ЭВМ. Расчетные формулы для определения параметров линий связи, выполненных проводным монтажом, даны в табл. 7.4.

В табл. 7.5 приведены формулы для расчета электрических параметров плоских кабелей некоторых конструкций. В таблице общий провод обозначен G , а сигнальный — S . В ряде случаев при проектировании РЭС удобно использовать эффективную диэлектрическую проницаемость среды $\epsilon_{r\text{эф}}$, с помощью которой можно определить волновое сопротивление кабеля по формуле

$$Z = Z_0 / \sqrt{\epsilon_{r\text{эф}}}$$

где Z_0 — волновое сопротивление линии в однородной воздушной среде.

Таблица 7.4

№ п/п	Сечение линии	Емкость единицы длины, Ф/м	Индуктивность единицы длины, Гн/км	Волновое сопротивление, Ом	Примечание
1		а) $\frac{\pi\epsilon}{\ln \frac{d}{\sqrt{r_1 r_2}}}$ б) $\frac{\pi\epsilon}{\ln(d/r)}$	$\frac{\mu}{\pi} \ln \frac{d}{\sqrt{r_1 r_2}}$ $\frac{\mu}{\pi} \ln(d/r)$	$\frac{120}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{d}{\sqrt{r_1 r_2}}$ $\frac{120}{\sqrt{\epsilon}} \ln(d/r)$	$r_1 = r_2$ $r_1 = r_2 = r$
2		а) $\frac{2\pi\epsilon}{\ln \left[\frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1} \right]}$ б) $\frac{2\pi\epsilon}{\ln(2h/r)}$	$\frac{\mu}{2\pi} \ln \left[\frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1} \right]$ $\frac{\mu}{2\pi} \ln(2h/r)$	$\frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \left[\frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1} \right]$ $\frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln(2h/r)$	$h \gg r$
3		$\frac{2\pi\epsilon}{\ln \left[\frac{d}{r_1} \left(\frac{d}{r_2} \right)^{1/2} \right]}$	$\frac{\mu}{2\pi} \ln \left[\frac{d}{r_1} \left(\frac{d}{r_2} \right)^{1/2} \right]$	$\frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \left[\frac{d}{r_1} \left(\frac{d}{r_2} \right)^{1/2} \right]$	—
4		а) $\frac{\pi\epsilon}{\ln \left(\frac{2h}{r} \frac{d}{\sqrt{4h^2 + d^2}} \right)}$ б) $\frac{\pi\epsilon}{\ln(d/r)}$	$\frac{\mu}{\pi} \ln \left(\frac{2h}{r} \frac{d}{\sqrt{4h^2 + d^2}} \right)$ $\frac{\mu}{\pi} \ln(d/r)$	$\frac{120}{\sqrt{\epsilon}} \ln \left(\frac{2h}{r} \frac{d}{\sqrt{4h^2 + d^2}} \right)$ $\frac{120}{\sqrt{\epsilon}} \ln(d/r)$	$h \gg d$
5		$\frac{2\pi\epsilon}{\ln(1,27 + h/r)}$	$\frac{\mu}{2\pi} \ln(1,27 + h/r)$	$\frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln(1,27 + h/r)$	$r \ll h$
6		$\frac{2\pi\epsilon}{\ln \left(\frac{2h}{r_1} \frac{d}{2h} \right)}$	$\frac{\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{2h}{r_1} \frac{d}{2h} \right)$	$\frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \left(\frac{2h}{r_1} \frac{d}{2h} \right)$	

Для получения $\epsilon_{гэф}$ в случае плоского кабеля используется формула [13]

$$\sqrt{\epsilon_{гэф}} = \sqrt{\epsilon_{\kappa}} (1 - n) + n$$

где ϵ_{κ} — относительная диэлектрическая проницаемость материала изоляции плоского кабеля; n — относительный объем воздушной среды, зависящий от конструкции плоского кабеля. Значение n определяется шагом установки проводников d , отношением толщины плоского кабеля H к шагу d . Для наиболее распространенной конструкции плоского кабеля зависимость представлена на рис. 7.6.

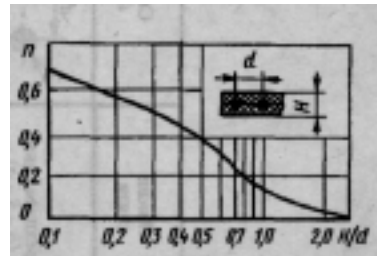

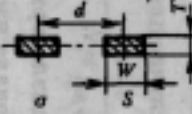
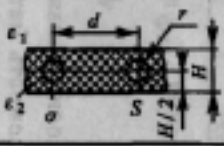


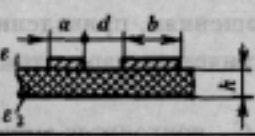
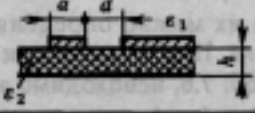
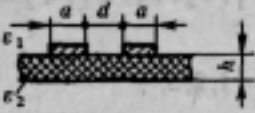
Рис. 7.6. Относительный объем воздушной среды в диэлектрике плоского кабеля

Таблица 7.5

№ ш/п	Линия связи	Сечение линии	Емкость на единицу длины, Ф/м	Индуктивность на единицу длины, Гн/м	Волновое сопротивление, Ом	Примечание
1	Трехпроводная ($\sigma - S - \sigma$)		$\frac{2\pi\epsilon}{\ln \left[\frac{d}{r_1} \left(\frac{d}{r_2} \right)^{1/2} \right]}$	$\frac{\mu}{2\pi} \ln \left[\frac{d}{r_1} \left(\frac{d}{r_2} \right)^{1/2} \right]$	$\frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left[\frac{d}{r_1} \left(\frac{d}{r_2} \right)^{1/2} \right]$	Погрешность менее 5%
2	Двухпроводная с проводниками прямоугольного сечения ($\sigma - S$)		$\frac{\pi\epsilon}{\ln v},$ где $v = d / (0,44 T + 0,25 W)$	$(\mu \ln v) / \pi$	$(120 / \sqrt{\epsilon_r}) \ln v$	$W/h \geq 5;$ $d \geq 3W$
3	Двухпроводная с проводниками круглого сечения в диэлектрическом слое ($\sigma - S$)		$\frac{\pi\epsilon_2}{\ln \left[\frac{H}{r} \left(\operatorname{ch} \frac{\pi d}{H} + 1 \right) \operatorname{th} \frac{\pi d}{2H} \right]}$	$(\mu/n) \ln (d/r)$	$\frac{120}{\sqrt{\epsilon_{r2}}} \sqrt{\ln (d/r) \ln A},$ где $A = \left[\frac{H}{r} \left(\operatorname{ch} \frac{\pi d}{H} + 1 \right) \operatorname{th} \frac{\pi d}{2H} \right]$	Погрешность менее 2 % при $\epsilon_2 / \epsilon_1 \geq 16;$ $d/r > 10;$ $H/2r > 10$

Расчет первичных и вторичных параметров печатного монтажа для односторонних печатных плат может быть проведен на основе справочных формул [35], полученных методом конформных преобразований (табл. 7.6). При этом система проводников заменяется плоскопараллельной системой бесконечно тонких пластин.

Таблица 7.6

№ п/п	Сечение	C_1	$m = K^2, m_1 = k$	$\epsilon_{r\text{эф}}$
1		$2 \frac{K}{K'}$	$m = ab / [(a+d)(b+d)]$ $m_1 = \frac{(t_1 - t_2)(t_3 - t_2)}{(t_1 + t_2)(t_2 + t_3)}$ t_i - см. (7.10)	$\epsilon_n + \frac{(\epsilon_n - \epsilon_n) K_1 K'}{2 K_1' K'}$
2			$m = a / (a+d)$ $m_1 = \frac{(1 - t_2)(t_3 - t_2)}{(1 + t_2)(t_2 + t_3)}$	
3		$\frac{K}{K'}$	$m = [d / (d+2a)]^2$ $m_1 = \left[\frac{\text{sh} \left(\frac{\pi d}{4h} \right)}{\text{sh} \left(\frac{\pi(d+2a)}{4h} \right)} \right]^2$	$\epsilon_n + \frac{(\epsilon_n - \epsilon_n) K K_1'}{2 K' K_1}$

Емкость определяется по формуле

$$C = 8,5 \epsilon_{r\text{эф}} C_1 l \text{ пФ}, \quad (7.8)$$

где $\epsilon_{r\text{эф}}$ — эффективная диэлектрическая проницаемость изоляционных материалов; C_1 — коэффициент, определяющий емкость на единицу длины рассчитываемой системы проводников; l — длина системы проводников, м.

При определении $\epsilon_{r\text{эф}}$ для одно- и двухсторонних плат необходимо учитывать диэлектрическую проницаемость основания платы $\epsilon_{\text{госн}} = 5,6 \dots 6$, лакового покрытия $\epsilon_{\text{лак}} = 4$ и воздуха $\epsilon_2 = 1$. Точный учет

всех составляющих $\epsilon_{r\text{эф}}$,.., осуществить трудно, но в любом случае $\epsilon_{r\text{эф}}$ определяется неравенством $\epsilon_{r0} < \epsilon_{r\text{эф}} < \epsilon_{r\text{осн}}$.

Методика расчета электрической емкости линии связи в печатном монтаже с помощью формулы (7.8) сводится к следующим этапам:

1. Вычисление модулей k и дополнительных модулей k' полных эллиптических интегралов первого рода K, K' . Модуль k определяется

геометрическими размерами расчетного сечения, и выражения для определения k, K, K' приводятся в справочных таблицах, а дополнительный модуль k' определяется из соотношения

$$k' = \sqrt{1 - k^2}$$

2. Определение модулярного угла $\alpha = \arcsin k$: и дополнительного модулярного угла $90^\circ \alpha' = \arcsin k'$.

3. Определение эллиптических интегралов K и K' как функции соответственно модулярного и дополнительного модулярного углов по таблицам полных эллиптических интегралов первого рода, приведенным, например, в [35].

4. Вычисление $C_l = f(K, K')$ по соотношениям, приведенным в справочных таблицах и связывающим геометрические параметры сечения линии и коэффициент C_l .

В большинстве случаев при вычислении C_l приходится вычислять K/K' или K'/K . Для упрощения расчетов их можно определить по графику (рис. 7.7) как функцию параметра m . При вычислении параметра m' по выражениям, приведенным в табл. 7.6, необходимо вычислить ряд вспомогательных коэффициентов t_1, t_2, t_3, q_1, q_2 , по следующим формулам [35]:

$$t_i = (\exp \lambda_i - 1) / (\exp \lambda_i + 1), \quad i = 1, 2, 3; \quad (7.9)$$

$$\lambda_i = \pi(2b + d)/2h; \quad \lambda_2 = \pi d/2h; \quad \lambda_3 = \pi(2a + d)/2h; \quad (7.10)$$

$$q_1 = \frac{\text{Sh}(pa/2h)\text{Sh}[p(a+b+2d)/2h]}{\text{Sh}(pd/2h)\text{Sh}[p(b+d)/2h]}$$

$$q_2 = \frac{\text{Sh}^2(pb/4h)}{\text{Sh}(pd/2h)\text{Sh}[p(b+d)/2h]}$$

Значения t_i , - по вычисленным λ_i , можно определить из графика (рис. 7.8).

Для элементов печатного монтажа двухсторонних печатных плат расчет емкости может быть проведен по формулам, представленным в табл. 7.7, а эффективная диэлектрическая проницаемость — по вспомогательному графику (рис. 7.9), где n — доля воздушной среды в общем объеме диэлектрической среды линии связи.

В многослойных печатных платах линии связи организуются в виде несимметричных линий в наружных слоях платы (см. табл. 7.7, п. 2) и симметричных линий во внутренних слоях платы (рис. 7.10).

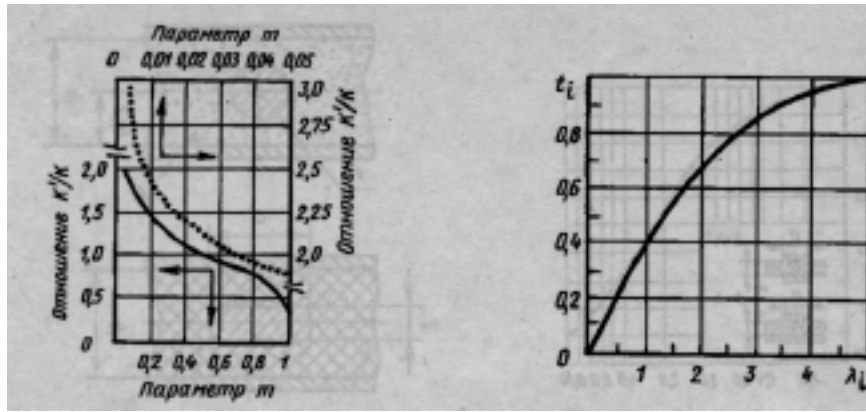


Рис. 7.7. Отношение K'/K как функции параметра m

Рис. 7.8. График зависимости f_1 от λ_L

Таблица 7.7

№ п/п	Сечение системы проводников	C_1	$\epsilon_{эф}$
1		$\frac{\pi}{\ln(4h/a)}$ $a/h \leq 1$	$[\pi \sqrt{\epsilon_1} + (1-\pi) \sqrt{\epsilon_2}]^2$ n - см. рис. 7.9
2		$\frac{2\pi}{\ln(8h/a)}$ $a/2h \leq 1$	

Для симметричных линий коэффициент C_1 при $t = 0$ рассчитывается по формуле $C_1 = 4K/K'$, а параметр m — по формуле $m = th^2(\pi a/2h)$.

Эффективная диэлектрическая проницаемость равна диэлектрической проницаемости материала оснований слоев платы.

Платы с тонкопроволочным монтажом (ТПМ) применяют при изготовлении малых партий изделий небольших размеров с хорошими высокочастотными характеристиками печатных плат, т.е. по степени интеграции микроэлектронных устройств они могли бы успешно конкурировать с МПП. Конструкции плат с ТПМ и плат стежкового монтажа реализуются с помощью автоматизированной укладки изолированного провода на основании.

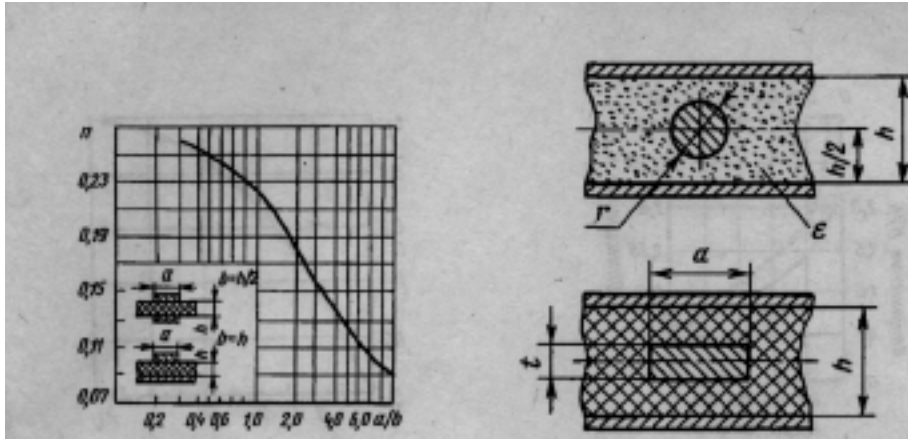


Рис. 7.9. Относительный объем воздушной среды в диэлектрике двухсторонних печатных плат

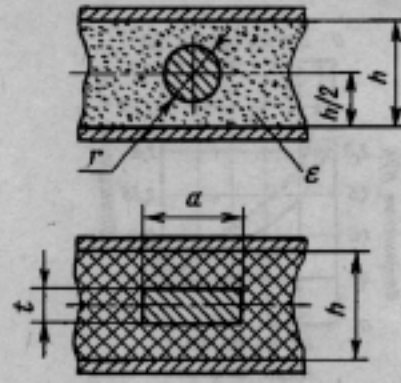


Рис. 7.10. Линия связи в печатном монтаже внутренних слоев МПП

Расчетная модель линии связи в этих случаях может быть сведена к системе «проводник над плоскостью», однако точная оценка электрофизических параметров усложняется из-за наличия вокруг провода диэлектриков, а также в ряде случаев из-за сложности конфигурации гра-

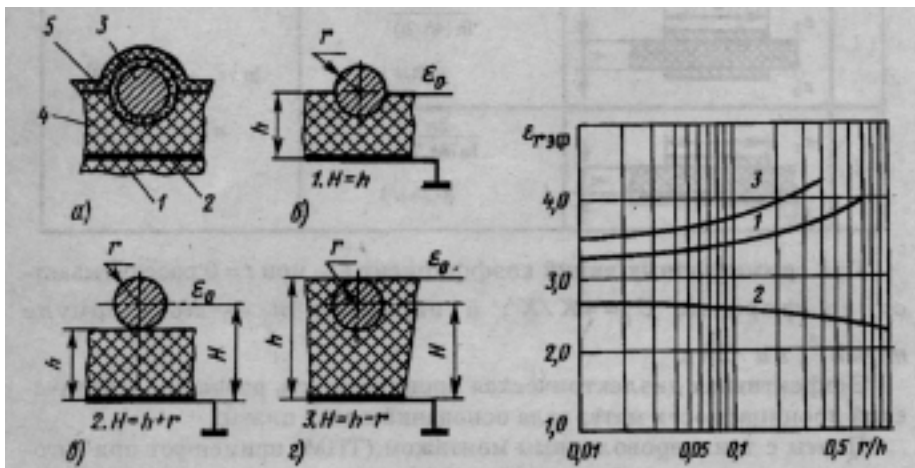


Рис. 7.11. Линия связи в плате ТПМ (а) и ее расчетные модели при различных толщинах адгезионного слоя (б, в, г): 1 — изоляционное основание; 2 — экранный слой; 3 — медный монтажный провод в изоляции; 4 — адгезионный слой; 5 — защитное покрытие

Рис. 7.12. Значение $\epsilon_{rэф}$ для линий ТПМ при $\epsilon_{rad} = 5$.

ниц раздела этих диэлектриков. Поперечное сечение линии связи в ТПМ показано на рис. 7.11,а. Для упрощенной модели линии (рис. 7.11,б) расчеты могут быть проведены с использованием графиков $\varepsilon_{эф} = f(r/h)$, представленных на рис. 7.12, на котором кривые 1-3 соответствуют вариантам б, в, и, з, на рис. 7.11 при $\varepsilon_{г ад}=5$. Коэффициент C_l рассчитывается по формуле

$$C_l = 2\pi / \ln(2h/r) \text{ при } 2h/r > 3,$$

а емкость линии — по формуле (7.8). Волновое сопротивление линий ТПМ определяется по формуле

$$Z = 17,08 + 34,83 \ln(h/r), 0,01 \leq r/h \leq 0,3.$$

Для двухстороннего стержневого монтажа коэффициент C_l рассчитывается по формуле

$$C_l = 2\pi / \ln(1,27+h/2r), h/r > 2;$$

диэлектрик линии принимается однородным, и тогда емкость на единицу длины линии $C/l = 17,7\pi\varepsilon_r / \ln(1,27+h/2r)$ пФ/м, индуктивность на единицу длины линии $L/l = \mu \ln(1,27+h/2r) / 2\pi$ Гн/м, волновое сопротивление

$$Z = 60 \ln(1,27+h/2r) / \sqrt{\varepsilon_r} \text{ Ом}$$

7.6. Конструирование электрических соединений

Основными методами выполнения электрических соединений являются следующие: пайка, сварка, накрутка и обжатие, соединение токопроводящими клеями, сравнительные характеристики и параметры которых приведены в табл. 7.8.

Таблица 7.8

Вид соединения	Переходное сопротивление, Ω	Механическая прочность, МПа	Интенсивность отказов $\times 10^{-9}, 1/ч$	Тепловое сопротивление, К/Вт
Сварка	0,01...!	100...500	0,1 ...2,0	0,001
Накрутка	1...2	60... 80	0,2 ... 0,5	0,0005
Пайка	2...3	10...40	1 ... 10	0,002
Обжимка	1...10	20...50	2.. .5	0,0008...0,00
Соединение токопроводящими клеями	1...10 Ом м*	5...10	10...50	5

* Удельное объемное сопротивление.

Таблица 7.9

№ п/п	Схема	Уровень коммутации	Электрические соединения
I		1	выводов корпуса микросхемы 1 с контактными площадками МПП 2
		2	микросхем 1 печатными трассами МПП 2
		3	ячеек между собой и с внешним соединителем блока объемными проводниками 4 в резиновом ремне 3
II		1	бескорпусных микросхем 9 проводниками подложек микросборок 7
		2	проволочными перемычками контактных площадок микросборок и многослойной платы 6
		3	микросборок трассами многослойной платы 6
		4	многослойных плат 6 печатными проводниками МПП 2
		5	ячеек между собой и с внешним соединителем блока объемными проводниками 4 в резиновом ремне 3

№ п/п	Схема	Уровень коммутации	Электрические соединения
III		1	выводов корпуса микросхемы с контактными площадками платы 10
		2	микросхем трассами платы 10
		3	плат 10 с МПП 2 проволочными перемычками 11
		4	плат 10 печатными проводниками МПП 2
		5	выводов МПП 2 с внешним соединителем блока объемным жгутом 15
IV		1	бескорпусных микросхем 9 трассами многослойной платы 6
		2	контактированием эластичного соединителя с общей коммутационной платой 16
		3	ячеек трассами платы 16
		4	выводов платы 16 и внешнего соединителя блока трассами шлейфа 13

Примечание. На схемах позициями 5, 12 и 14 соответственно обозначены места коммутационных переходов от ячейки к пакету ячеек, несущие основания пакета ячеек и одной из них.

Конструкции электрических соединений во многом определяются элементной базой, диапазоном частот, структурным уровнем сборки и условиями эксплуатации, а также условиями экономичности и производительности.

Конструкции всех электрических соединений можно рассматривать как по структурным уровням аналогично структурным уровням РЭС [37], так и в последовательности их конструктивно-технологического исполнения.

Производство и конструкция РЭС упростятся, если в конструкции будет использовано минимальное число уровней соединений при минимуме различных вариантов конструктивно-технологического исполнения соединений. В табл. 7.9 показаны эскизы четырех схем компоновки РЭС с рассмотрением их уровней соединений. Основные показатели конструкций блоков сведены в табл. 7.10.

Таблица 7.10

Показатели	Характеристики компоновки РЭС			
	I	II	III	IV
Число модулей в блоке	14	6	6	5
Удельная масса электрических соединений, г/ИС	2,75	0,64	1,7	0,16
Объем блока, дм ³	0,9	0,4	0,7	0,45

Приведенные схемы были использованы при реализации блока на 800 микросхем (ИС) с размерами ячеек по длине и ширине 95x78 мм [36]. Анализ данных табл. 7.10 позволяет сделать вывод, что схемы II и IV обеспечивают наименьшие габариты и удельную массу электрических соединений.

8. ВОПРОСЫ ЭРГОНОМИКИ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ РЭС

8.1. Человекомашинные системы, их классификация и свойства

Термин «эргономика» (греч. *ergon* — работа, *nomos* — закон) обозначает науку о взаимодействии человека-оператора с машиной и средой, объединенных в единую человекомашинную (эргатическую) систему. Эргономика возникла на стыке технических наук, психологии, физиологии и гигиены труда. Инженерная психология ставит своей целью комплексное проектирование внешних и внутренних средств де-

тельности человека-оператора. Художественное конструирование подразумевает использование основных законов эргономики и технической эстетики при разработке конструкций. Инженерная психология и художественное конструирование являются составными частями эргономики — общего научного направления многопланового характера.

Важнейший вопрос проектирования человекомашинных систем — это строго научное разделение функций между оператором и машиной в будущей системе. Этого не может сделать ни психолог, ни физиолог, ни гигиенист, поскольку они не знают свойств машин и требуемых характеристик всей системы. Это обязан сделать конструктор-разработчик, обладающий знаниями эргономики, знающий возможности оператора в системе, уровень современной автоматизации и реализующий общие требования к системе.

Убедительным примером необходимости развития этой науки в области радиотехники и конструирования РЭС является тот факт, что сравнительный анализ существующих американских ракетных систем показал, что ошибки человека-оператора составляют 20...53% всех отказов в системе. Нетрудно уяснить, какую роль играет человек-оператор в современных системах контроля и производства. Поэтому изучение возможностей человека-оператора в замкнутой эргатической системе и согласование его аппарата восприятия с РЭС для оптимизации основной целевой функции системы является не «модой», а такой же необходимой задачей, как и само проектирование технических средств.

В общее понятие «система» входит совокупность элементов, взаимосвязанные функции которых координированы для выполнения некоторой общей задачи. Человекомашинная система (ЧМС) — это система, содержащая качественно разнородные компоненты — человека и технические средства. Такие системы чрезвычайно разнообразны и иерархичны. Например, система «командир корабля (первый пилот) — приборы, органы управления — самолет» и система «штурман — радист — радиоаппаратура самолета» находятся во взаимосвязи, но и подчинены более сложной системе «самолет, выполняющий задание», которую обслуживают ряд наземных систем и компонентов, являющихся также эргатическими системами.

В настоящее время системы «человек-машина» в связи с развитием технических средств все более превращаются из систем контроля в системы управления, в которых человек-оператор занимает доминирующее положение. Можно привести несколько примеров моделирования как человека-оператора в ЧМС, так и самих систем в целом. Например, для системы управления предлагается одна схема (рис. 8.1,а), а для системы обнаружения, контроля — другая схема (рис. 8.1,б). Весьма часто

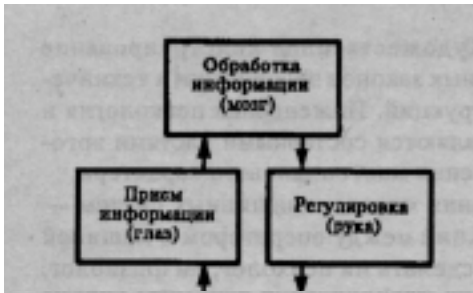
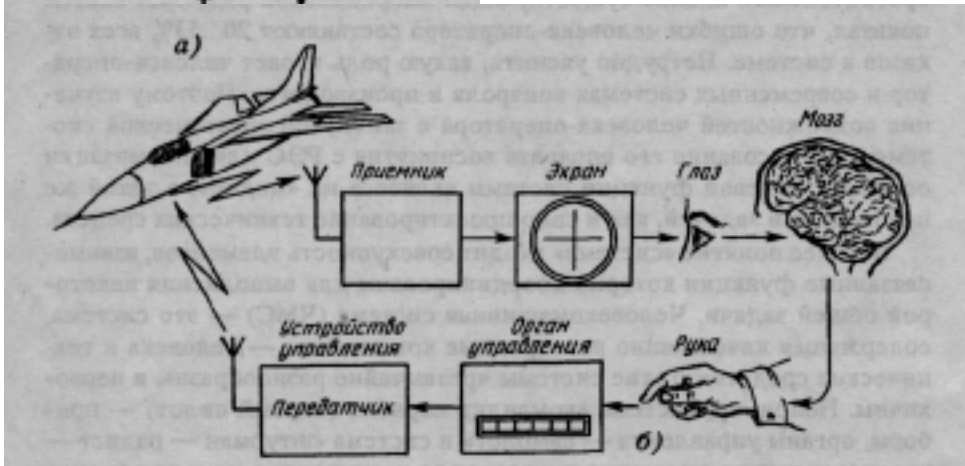


Рис. 8.1. Схематическое представление ЧМС:
а — системы управления;
б — системы контроля



проводится аналогия между эрратической системой и сервосистемой. Сервосистема — это тип следящей замкнутой электромеханической системы, где на выходе воспроизводится измененная определенным образом входная величина.

Классификация ЧМС может быть проведена по ряду признаков. По основной целевой функции они делятся на контрольные, управления, поисковые, восстанавливающие, обучающие системы. В случае контрольной системы (см. рис. 8.1,б) выходные сигналы оператора можно вводить в наблюдаемую им систему. Оператор здесь включен в систему «как бы параллельно ей» (хотя по схеме рисунка это выглядит последо-

вательно). Основная функция оператора — контроль, наблюдение за системой, измерение ее параметров.

В системе управления (см. рис. 8.1,а) оператор становится непосредственным участником выполнения системой ее задач и включен в работу «как бы последовательно» (по схеме рисунка — параллельно) с техническими элементами системы. Основная функция оператора — регулирование, слежение, стабилизация и приведение координат выхода системы к их заданному значению. Эта система замкнута через оператора. Системы управления могут быть двух видов: система слежения с компенсацией и система слежения с преследованием. В первом случае оператор наблюдает только рассогласование между текущим выходным показателем (координатой) системы и требуемым значением. Его задача состоит в том, чтобы довести величину рассогласования до нуля или до заданного уровня, т.е. скомпенсировать ошибку рассогласования. Примерами таких систем могут являться системы регулирования самих РЭС, системы регулирования технологических процессов и т.п.

При слежении с преследованием оператор наблюдает величину как входного, так и выходного сигналов, и его задача состоит в том, чтобы, управляя машиной, изменять выход системы и тем самым как бы «преследовать» вход системы. Примерами таких систем могут служить система посадки самолета, работа бортовой РЛС в режиме захвата и сопровождения цели и т.д.

Поисковая система, как правило, образуется при отказе функционирующей радиоаппаратуры, когда требуется вмешательство оператора для определения причин и места отказа. Она включает в себя оператора, проверяемую машину и устройство поиска.

Восстанавливающая система возникает после определения причины отказа, и главная функция оператора в такой системе — восстановить систему путем ремонта или демонтажа неисправного блока.

Примерами обучающих систем являются различного рода тренажеры, обучающие машины и т.п.

По типу информационной модели ЧМС делятся на системы с дифференциальной информационной моделью и интегральной информационной моделью.

Дифференциальная информационная модель включает в себя подробные сведения об отдельных параметрах системы. Как правило, информация от машины к оператору поступает первичная без предварительной обработки. При этом оператор получает точную количественную оценку состояния отдельных элементов технической части системы, ее выходных параметров. Чтобы получить общее представление о состоянии системы на основе показаний детальной модели, оператору необходимо определенное время для обработки всей разрозненной ин-

формации. При дефиците времени это может привести к принятию неверных решений. Примером такой дифференциальной модели может служить совокупность контрольных шкал приборов, устанавливаемых в кабине летчика. Поэтому при современных скоростях самолетов стремятся создать совмещенную (интегральную) индикаторную панель. На рис. 8.2, *а* показана индикаторная панель самолета в режиме поиска цели. Однако назвать это интегральной моделью пока что нельзя.

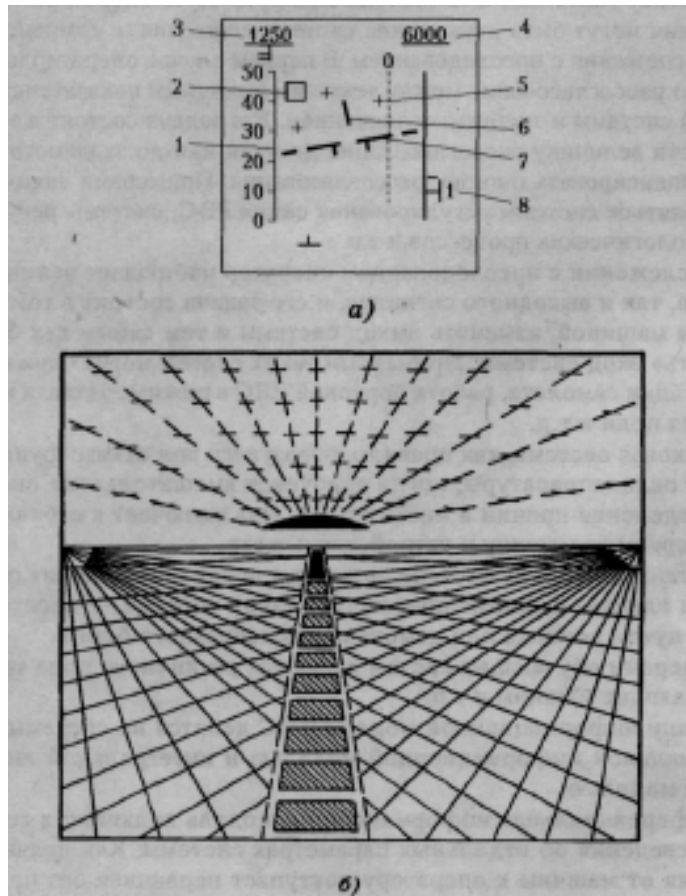


Рис. 8.2. Совмещенные индикаторы: *а* — самолетный (1 — шкала дальности до цели, 2 — строб цели, 3 — скорость полета самолета, 4 — высота полета самолета, 5 — цель, 6 — положение самолета относительно горизонта, 7 — горизонтальная ось самолета, 8 — положение антенны); *б* — коналוג

вательно). Основная функция оператора — контроль, наблюдение за системой, измерение ее параметров.

В системе управления (см. рис. 8.1,а) оператор становится непосредственным участником выполнения системой ее задач и включен в работу «как бы последовательно» (по схеме рисунка — параллельно) с техническими элементами системы. Основная функция оператора — регулирование, слежение, стабилизация и приведение координат выхода системы к их заданному значению. Эта система замкнута через оператора. Системы управления могут быть двух видов: система слежения с компенсацией и система слежения с преследованием. В первом случае оператор наблюдает только рассогласование между текущим выходным показателем (координатой) системы и требуемым значением. Его задача состоит в том, чтобы довести величину рассогласования до нуля или до заданного уровня, т.е. скомпенсировать ошибку рассогласования. Примерами таких систем могут являться системы регулирования самих РЭС, системы регулирования технологических процессов и т.п.

При слежении с преследованием оператор наблюдает величину как входного, так и выходного сигналов, и его задача состоит в том, чтобы, управляя машиной, изменять выход системы и тем самым как бы «преследовать» вход системы. Примерами таких систем могут служить система посадки самолета, работа бортовой РЛС в режиме захвата и сопровождения цели и т.д.

Поисковая система, как правило, образуется при отказе функционирующей радиоаппаратуры, когда требуется вмешательство оператора для определения причин и места отказа. Она включает в себя оператора, проверяемую машину и устройство поиска.

Восстанавливающая система возникает после определения причины отказа, и главная функция оператора в такой системе — восстановить систему путем ремонта или демонтажа неисправного блока.

Примерами обучающих систем являются различного рода тренажеры, обучающие машины и т.п.

По типу информационной модели ЧМС делятся на системы с дифференциальной информационной моделью и интегральной информационной моделью.

Дифференциальная информационная модель включает в себя подробные сведения об отдельных параметрах системы. Как правило, информация от машины к оператору поступает первичная без предварительной обработки. При этом оператор получает точную количественную оценку состояния отдельных элементов технической части системы, ее выходных параметров. Чтобы получить общее представление о состоянии системы на основе показаний детальной модели, оператору необходимо определенное время для обработки всей разрозненной ин-

формации. При дефиците времени это может привести к принятию неверных решений. Примером такой дифференциальной модели может служить совокупность контрольных шкал приборов, устанавливаемых в кабине летчика. Поэтому при современных скоростях самолетов стремятся создать совмещенную (интегральную) индикаторную панель. На рис. 8.2, *a* показана индикаторная панель самолета в режиме поиска цели. Однако назвать это интегральной моделью пока что нельзя.

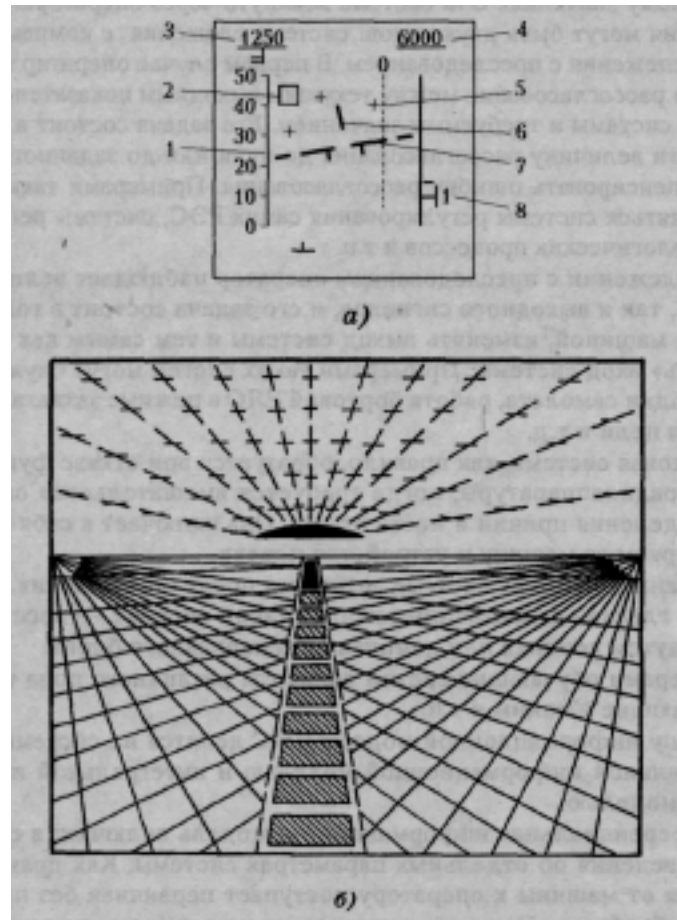


Рис. 8.2. Совмещенные индикаторы: *a* — самолетный (1 — шкала дальности до цели, 2 — строб цели, 3 — скорость полета самолета, 4 — высота полета самолета, 5 — цель, 6 — положение самолета относительно горизонта, 7 — горизонтальная ось самолета, 8 — положение антенны); *б* — коналог

Интегральная информационная модель дает общее представление о функционировании. Для этого в системе используют дополнительные блоки обработки первичной информации. Например, разработаны индикаторы — «коналоги» (рис. 8.2, б), дающие условные изображения взлетно-посадочной полосы или «дороги» при движении объекта. Хотя изображение проецируется на электронно-лучевой индикатор, оно не является телевизионным. Основное преимущество коналогов состоит в том, что они позволяют использовать основное свойство восприятия — предметность. Кроме этого, рассмотренный тип коналогов позволяет освободиться от восьми отдельных индикаторов. Другой особенностью коналогов является также то, что они предусматривают получение точной количественной информации либо «по вызову», либо с помощью дополнительных периферийных индикаторов, обрамляющих коналог.

Свойства ЧМС определяются свойствами основных ее звеньев, а именно: оператора и «машины». Отметим те из них, по которым оператор или машина превосходят друг друга при выполнении определенных функций [38].

Оператор превосходит «машину» в следующих функциях:

- обнаружении слабых световых и звуковых сигналов;
- восприятию, интерпретации и организации сигнальных образов различных модальностей;
- осуществлении гибких операций управления;
- хранении большого количества информации в течение длительного времени и ее использовании в нужный момент;
- образовании интуитивных умозаключений;
- изменении показателей в результате обучения;
- формировании понятий и выработке методов;
- организации и объединении показателей входов, различных по параметрам, по модальности.

«Машина» превосходит человека-оператора по следующим показателям:

- быстроте ответов на сигналы;
- способности применить плавно и точно большую силу;
- возможности выполнять повторные стереотипные действия и задачи;
- способности хранить информацию в сжатой форме и полностью освободиться от ненужных составляющих;
- скорости расчетов;
- способности выполнять одновременно несколько различных функций.

Прежде чем подробно остановиться на параметрах оператора и технических средств и их согласовании, отметим некоторые общие правила разработки ЧМС.

1. При разработке необходимо применять системный подход, а именно:

а) выяснить взаимосвязи и свойства совокупности объектов, входящих в систему, в том числе и оператора;

б) создавать и применять такие системы, которые давали бы компромиссы между «машиной» — оператором — средой для оптимизации основной целевой функции всей системы (получить оптимальную систему для всех оптимальных звеньев невозможно).

2. Несмотря на совместное выполнение функций оператором и «машиной», каждая из таких составляющих ЧМС подчиняется в своей работе собственным, свойственным ей принципам и закономерностям.

3. Необходимо помнить, что оператор «не любит крайностей»: ему плохо работает как при дефиците, так и при избытке времени (предъявления информации), как при ярком освещении, так и в темноте и т.д.

4. Система должна быть сконструирована так, чтобы оператор мог непрерывно принимать участие в ее функционировании на уровне, соответствующем его возможностям (низкий уровень интереса к работе и моральное состояние оператора могут быть связаны с двумя обстоятельствами: оператор имеет низкую квалификацию, а управление аппаратурой требует высокой квалификации и, наоборот, требуется низкая квалификация от высококвалифицированного оператора).

5. Максимальная автоматизация не всегда полезна: думающий оператор занимает центральное место в системе, поэтому задача состоит не в том, чтобы показать высокую автоматизацию системы, а в том, чтобы доказать необходимость автоматизации; машина служит не для вытеснения и замены оператора, а для умножения его мощи и способностей.

В заключение рассмотрим вопросы распределения функций в ЧМС. При проектировании любой радиоэлектронной системы, будь то радиолокационная станция, система ближней навигации, контрольно-испытательная аппаратура или просто электронные часы, мы, по существу, решаем задачу распределения функций между человеком и РЭС. Обоснование рационального или оптимального варианта распределения этих функций опирается на результаты количественных оценок качества выполнения задач оператором и РЭС и методы оценок влияния этого качества на эффективность системы в целом. В результате распределения функций между оператором и РЭС могут быть получены исходные данные для обоснования объема информации, вида ее предъявления, скорости и способа ее обработки.

Функции человека в системе «оператор-РЭС» достаточно разнообразны и определяются особенностями РЭС. В системах обнаружения сигналов (например, локационный обзор участка пространства) человек осуществляет обнаружение, наблюдение, классификацию сигналов с помощью тех признаков, которые учтены автоматизированным устройством системы, распределением каналов получения информации, а также обобщением информации и ее согласованием с пропускной способностью каналов связи. Диспетчерские системы обуславливают следующие функции человека: выдачу и редактирование исходных данных; выдачу команд и пуск системы; принятие решений в неопределенных ситуациях; прогнозирование обстановки при ее изменении; выбор целей в зависимости от обстановки; операции контроля за работой системы.

Системы слежения позволяют опознать «свой-чужой» объект, следить за сигналами с помощью признаков, не учтенных в каналах автоматической обработки информации, принимать решения в аварийных ситуациях.

Функции человека в системах связи (связные радиостанции) можно определить следующим образом: выбор каналов связи в зависимости от обстановки, выделение значимой информации и ее классификация по приоритету, обеспечение слуховой радиосвязи, передача информации.

В контрольно-испытательных системах (стенды, пульта) оператор должен определять виды программ автоматической проверки системы и выдавать команды на их пуск, оценивать результаты проверки системы, выборочно проверять состояние и функционирование узлов и частей системы при отсутствии информации о неисправностях, диагностировать вид неисправности и ее причины, принимать решение о мерах по восстановлению системы.

8.2. Сенсорный вход оператора и его параметры

Человек воспринимает поступающую из окружающей среды информацию с помощью органов зрения, слуха, осязания, вкуса, обоняния, болевых ощущений, степень реакции которых отражена в табл. 8.1.

Каждый из этих органов имеет свой «порог чувствительности», «пропускную способность», «область применения» в ЧМС. Различают «сенсорный вход» человека-оператора (зрение, слух, осязание, обоняние и т.п.) и «моторный выход» — рабочие движения рук, ног, туловища, характеризующие пространство, временные и силовые показатели. Отметим некоторые общие свойства сенсорного входа человека-оператора [38].

Таблица 8.1

Способы получения информации	Время реакции, мс
Тактильный (прикосновение)	105 ± 10%
Слуховой (звук)	150 + 20%
Зрительный (свет)	185 + 19%
Обонятельный (запах)	350 ± 11,4%
Температурный (тепло — холод)	940 ± 70%
Вкусовой (кислое, сладкое, горькое)	695 ± 55%
Движение (действие на вестибулярный аппарат)	600 ± 33%
Болевой	510+ 75%

Первое свойство. Человек не может решать простую задачу на различение одиночных моносигналов, если их число превышает 7 («магическое число 7 ± 2 »).

В одном из опытов испытуемым предлагали различать по частоте тона в диапазоне от 100 Гц до 8 кГц. Ошибки не было при двух-трех тонах, предъявляемых отдельно. При четырех тонах начали появляться случайные ошибки. При пяти тонах число ошибок возросло, а при 14 тонах была сплошная путаница. Аналогичные результаты дали опыты со зрением, с кожной и вкусовой чувствительностью.

Второе свойство. При усложнении информации (увеличение числа признаков сигналов, например оттенка и насыщенности цветовых тонов раздражителей) количество воспринимаемой информации увеличивается (с 7 до 11...15 цветов).

Третье свойство. Наибольшей пропускной способностью информации обладает зрительный аппарат (5 бит/с), затем слуховой (0,3 бит/с), которые чаще применяются в ЧМС.

Четвертое свойство. Перекодирование информации резко изменяет пропускную способность сенсорного входа оператора.

Пример. Дана последовательность знаков в двоичных выражениях:

1010001001 1 1001 1 10, которую запомнить и воспроизвести весьма трудно. Если обозначит: 00 — 0, 01 — 1, 10 — 2, 11 — 3, то получим 220213032, что запоминается, но все-таки с трудом. Если же ввести обозначения: 000 — 0, 001 — 1, 010 — 2, 011 — 3, 100 — 4, 101 — 5, 110 — 6, 111 — 7, то получим 504716, запомнить которое весьма просто.

Пятое свойство. Перегрузка информацией и дефицит времени снижают пропускную способность оператора. В одной из лабораторий американских космических исследований изучали работу операторов в

кабине космического тренажера. Испытуемым подавали световые сигналы, на которые они должны были отвечать определенным образом. Если сигналы подавались один раз за 9...10 с, то операторы работали нормально, когда же темп подачи информации возрос в 10 раз (количество сигналов в секунду), то наблюдалась перегрузка информацией (пропуск и неверные ответы). Интересно отметить, что когда темп уменьшился в 10 раз по сравнению с нормальным, то пропуски информации и ошибки вновь участились.

Отсюда следует, что наибольшая чувствительность и пропускная способность сенсорного входа человека зависят от частоты предъявления информации. Основным источником получения информации в системе «оператор — РЭС» является зрительный аппарат оператора, свойства которого рассмотрим более подробно.

Глаз человека обладает рядом свойств, которые необходимо учитывать при конструировании средств отображения информации в РЭС. Различают абсолютный и дифференциальный (контрастный) пороги чувствительности глаза [39]. Абсолютным порогом световой чувствительности глаза называют минимально обнаруживаемую величину яркости светового пятна на черном фоне в условиях отсутствия какого-либо освещения. Он лежит в диапазоне $10^{-6} \dots 10^{-9}$ кд/м². Это означает, что световые ощущения в условиях абсолютной темноты могут быть вызваны лучистой энергией всего в несколько квантов.

Диапазон яркостей, которые воспринимает глаз, имеет порядок 10^{12} . Вполне естественно, что при таком изменении яркости глаз должен обладать известной адаптацией. Изменение чувствительности глаза по мере пребывания оператора в темноте называется темновой адаптацией. Причем увеличение световой чувствительности происходит в первые моменты времени непрерывно и устанавливается на постоянном уровне лишь спустя 60...80 мин. Под световой адаптацией глаза понимают изменение чувствительности при увеличении яркости поля адаптации от нулевого до некоторого заданного. При этом происходит понижение световой чувствительности, и постоянный уровень устанавливается примерно через 5...10 мин в зависимости от яркости.

Различают по величине яркости B поля адаптации: дневное освещение ($B \geq 10$ кд/м²), сумеречное ($0,01 \text{ кд/м}^2 \leq B \leq 10 \text{ кд/м}^2$) и ночное ($B \leq 0,01 \text{ кд/м}^2$). Операторы РЭС обычно работают при ночном и сумеречном освещении, а операторы устройств отображения информации — при сумеречном или дневном.

Если оператор работает в условиях, далеких от абсолютного порога чувствительности, то возможность раздельного видения предметов определяется не абсолютной чувствительностью глаза, а его способно-

стью различать локализованные в отдельных местах контрасты яркости. Чаще всего для определения контраста используют соотношение

$$K = \frac{B_1 - B_2}{B_2}$$

где B_1, B_2 — яркость объекта и яркость фона соответственно.

Если $B_1 > B_2$, то контраст называется прямым; если $B_1 < B_2$, то — обратным. Применительно к задачам обнаружения сигналов целей на индикаторах с лучевым экраном более удобно пользоваться выражением

$$K = \frac{B_1 - B_2}{B_1 + B_2}$$

так как яркость отдельных точек экрана, образующих фон, является случайной величиной, и при решении задач обнаружения оценке подлжит лишь сам факт обнаружения сигнала (наличия контраста). Сигнал в одной из двух сравниваемых точек обнаруживается оператором при условии, если $|K| \geq K_0$, где K_0 — порог контрастной чувствительности глаза при заданных условиях наблюдения.

Порог контрастной чувствительности глаза изменяется с изменением яркости поля адаптации и оказывается неразрывно связанным с такими характеристиками зрения, как инерция и острота зрения. Порог видимости зависит от следующих величин: контраста, углового размера цели, яркости поля адаптации и времени наличия цели. В каждом конкретном случае мы говорим лишь о какой-то одной пороговой величине, потому что остальные три при проведении опыта фиксируются заранее. Как увеличение яркости поля адаптации, так и увеличение площади отметки ведут к уменьшению порога контрастной чувствительности глаза.

Временной порог чувствительности глаза оператора — это минимально необходимое время существования отметки для ее зрительного восприятия. Эта величина колеблется в пределах тысячных и сотых долей секунды. Она зависит от инерции зрения, которая, в свою очередь, определяется яркостью фона. Отметим, что с увеличением освещенности уменьшается время инерции глаза и порог контрастной чувствительности. При этом острота зрения увеличивается. Остроту зрения или разрешающую способность глаза характеризуют порогом разрешения — минимальным угловым промежутком между равноудаленными точками, при котором они воспринимаются глазом еще раздельно. Предельный угол разрешения L' имеет порядок несколько десятых угло-

вой минуты. Связь между ним и величиной K_0 определяется по формуле $L' = CK_0$, где C — постоянная, не зависящая от яркости поля адаптации. Таким образом, острота зрения является функцией контрастной чувствительности глаза.

Глаз человека различает объекты не только по яркости, но и по цвету. Величина, обратная интенсивности лучистой энергии, необходимой для вызывания у человека впечатления некоторой определенной яркости, и характеризующая чувствительность глаза к излучению на той или иной частоте (к цвету), называется видностью. В условиях сумеречного зрения зависимость видности от длины волны (цвета) несколько смещается в сторону уменьшения длины волны, т.е. максимум чувствительности из желтой области перемещается в зеленую.

Спектральная чувствительность глаза обязательно должна учитываться при выборе ЭЛТ или другого индикаторного устройства для того, чтобы путем согласования спектра излучения люминофора и полосы пропускания применяемых светофильтров обеспечить наилучшие согласование и условия передачи информации оператору [39]. Надо также иметь в виду, что как при значительном увеличении яркости, так и при значительном ее уменьшении число различных цветовых тонов уменьшается. Это особенно важно для индикаторов РЛС с цветовой индикацией.

Важными факторами в восприятии оператором отметок целей являются задача обнаружения и способ их кодирования. В табл. 8.2 в зависимости от задачи и способа кодирования представлена средняя длительность фиксации II (время остановки глаза оператора на отметке).

Таблица 8.2

Задача оператора	t , с
Поиск простых геометрических фигур	0,2
Поиск условных знаков, букв, цифр	0,3
Поиск цели на экране индикатора	0,37
Счет условных знаков	0,52
Обнаружение изменения в обстановке на экране индикатора кругового обзора	0,55
Ознакомление с обстановкой на экране ИКО	0,64

Время, необходимое на получение информации от системы отображения информации сенсорным входом оператора, можно представить в виде суммы [40]

$$T = \sum_{i=1}^N t_i(i) + \sum_{i=1}^N t_p(i) + t_c + t_l$$

где N — число индикаторов для отображения информации; $t_i(i)$ — время ознакомления с показаниями i -го индикатора; $t_p(i)$ — время перевода глаз с одного индикатора на другой; t_c — время самопроизвольной отвлекаемости; t_l — время реакции на i -й индикатор, т.е. время задержки, с которой человек получает и воспринимает информацию (латентный период); характеризует реакцию человека на раздражитель.

При разработке конкретного прибора успешная работа будущего пользователя будет определяться очередностью и типом задач: степенью участия оператора в работе РЭС, объемом выходной информации, оборудованием лицевой панели прибора, размерами, расположением элементов, яркостью символов.

При равномерном поступлении любых символов количество информации в битах определяется по формуле:

$$K_i = n \log_2 N,$$

где N — число символов, поступающих с лицевой панели для отображения информации; n — число правильно опознанных оператором символов.

Скорость восприятия информации с прибора или пропускная способность оператора в бит/с находится как

$$F(\text{оп}) = K_i / T,$$

где T — время отображения (предъявления) информации, с.

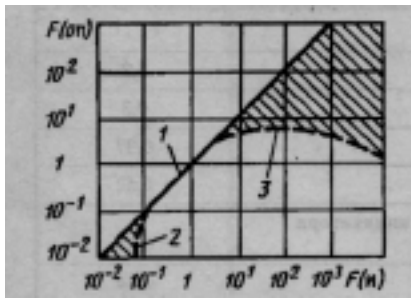


Рис. 8.3. График зависимости пропускной способности оператора от частоты предъявления информации

Если информация появляется со скоростью $F(\text{и})$, то для безошибочной работы системы необходимо выполнение условия: $F(\text{оп}) = F(\text{и})$, что соответствует графику в виде прямой 1 на рис. 8.3. Реально оператор начинает допускать ошибки за пределами интервала $0,1 \text{ бит/с} \leq F(\text{и}) \leq 5,5 \text{ бит/с}$ (пунктирная линия 2).

При $F(\text{и}) \leq 0,1 \text{ бит/с}$ ошибки появляются за счет самопроизвольной отвлекаемости. Оператору надоедает постоянно смотреть на индикатор, на котором ничего не изменяет-

ся. При $F(i) > 5,5$ бит/с оператор из-за утомления не успевает усваивать информацию в течение длительного времени. Происходит пропуск символов информации. Если информация предъявляется одновременно от нескольких индикаторов, то оператор должен осуществить поиск нужных ему символов. Увеличение затрат времени будет определяться числом движений глаз и средней длительностью фиксаций.

Таким образом, разрабатывая индикаторную панель, конструктор должен позаботиться о согласовании потока информации, поступающей с нее, с физиологическими возможностями человека. Общее количество информации, которое воспринимается, передается и перерабатывается оператором, можно представить в виде суммы трех слагаемых: зрительной $F(z)$, речевой $F(p)$ и письменной $F(nc)$ информации:

$$F(on) = F(z) + F(p) + F(nc).$$

Количество зрительной информации равно $F(z) = F \sum_{i=1}^N I(i)/T$. Здесь

$$I(i) = n \log_2(x-x')/(2\gamma) = n \log_2 N(i),$$

где n — количество измеряемых параметров; x, x' — диапазон измерения контролируемых величин; γ — погрешность измерения; $N(i)$ — длина алфавита сообщения; T — время между двумя посылками информации. Количество речевой информации находится как

$$F(p) = F \sum_{i=1}^{NF} P(i) \log_2 F(i)$$

где F — число фонем в сообщении; $F(i)$ — длина алфавита сообщения; $P(i)$ — вероятность появления i -я фонемы; NF — число фонем устной речи. Фонема — отдельная звуковая единица. В устной речи русского языка существует 41 фонема: 35 — согласных (твердых и мягких) и 6 — гласных.

Количество письменной информации равно

$$F(nc) = B(B) \sum P(n) \log_2 B(n)$$

где $B(B)$ — количество букв в сообщении; NP' — длина алфавита письменного сообщения; $P(n)$ — вероятность появления n -й буквы; $B(n)$ — длина алфавита n -го сообщения.

8.3. Моторный выход и рабочая зона оператора

Моторный выход оператора (движения рук, ног, положения тела) осуществляет ответную реакцию на получение информации сенсорным входом. Возможности моторного выхода зависят от средних антропометрических данных оператора и определяют правила разработки рабочих зон [41].

Рабочей зоной оператора обычно является лицевая панель РЭС, на которой размещаются те или иные средства отображения информации и органы управления. Лицевые панели располагаются таким образом, чтобы плоскости индикаторов были перпендикулярны линии взгляда оператора, а органы управления находились в пределах досягаемости рук.

Лицевые панели размещаются следующими способами:

фронтально, когда зона ограничена снизу на 700—750 мм от пола, в глубину (от оператора) на 500-600 мм и сбоку (справа и слева) расстоянием 700—750 мм. Эти цифры являются оптимальными для нормальной работы оператора, например в горизонтальной плоскости;

трапецевидно, когда панель состоит из фронтальной панели длиной 600—1000 мм и развернутых к ней под углом в 105° двух створок длиной порядка 300 мм, при этом глубина действий оператора от фронтальной панели составляет порядка 375 мм;

полукругом (многогранник), когда минимальный радиус полукруга равен 600 мм.

Существует ряд общих правил размещения органов управления и индикаторов в рабочей зоне. Для органов управления:

1) количество и траектория движений при работе должны быть сокращены до минимума;

2) органы управления надо располагать так, чтобы правой рукой выполнять наиболее ответственные операции;

3) если орган управления находится рядом с индикатором, то ручка, управляемая правой рукой, должна находиться правее и ниже, а ручка, управляемая левой рукой — левее и ниже индикатора;

4) последовательно используемые органы управления надо располагать на одной высоте слева направо или сверху вниз в вертикальных столбцах;

5) основные органы управления целесообразно размещать в оптимальной зоне, аварийные — в средней зоне досягаемости руки, а второстепенные — в зоне максимальной досягаемости.

Индикаторы зрительной информации рекомендуется размещать в оптимальных участках поля зрения, которые характеризуются в горизонтальной плоскости углом $30\text{—}40^\circ$ и $0\text{—}30^\circ$ вниз от линии взора. На-

иболее важные индикаторы располагают на линии глаз оператора или ниже.

Существуют некоторые общие принципы размещения индикаторов на панелях приборов:

принцип функциональной организации, согласно которому приборы группируются исходя из общности выполняемых задач;

принцип значимости, согласно которому наиболее важные приборы, даже при редком их использовании, располагают в центре панели;

принцип последовательности, заключающийся в том, что приборы размещают строго согласно схеме их последовательного использования.

Следует добавить, что для повышения восприятия информации, представленной в виде букв, знаков, символов, индикаторы рекомендуются располагать в верхнем левом углу прибора, что объясняется навыками чтения.

8.4. Средства отображения информации

Средства отображения информации предназначены для предъявления человеку данных, характеризующих объект управления.

При выборе электромеханических (стрелочных) приборов необходимо обращать внимание на тип шкалы, ее форму, размеры оцифровки, цену деления, а также на расположение и вид стрелок. Шкалы бывают двух типов: неподвижная шкала с движущейся стрелкой и подвижная шкала с неподвижным визиром. По форме шкалы бывают круглые, полукруглые, прямоугольные, горизонтальные, вертикальные, шкалы типа «открытое окно». При выборе типа и формы шкалы необходимо учитывать следующие рекомендации.

1. При малом времени считывания показаний (менее 0,5 с) рекомендуется применять подвижные шкалы с неподвижным указателем, что исключает поисковые движения глаз. Условия считывания в этом случае приближаются к условиям считывания показаний со счетчика, а при увеличении времени считывания меньшей погрешностью обладают неподвижные шкалы с двигающейся стрелкой.

2. Применение шкал типа «открытое окно» рекомендуется для определения точных качественных данных при самой высокой точности считывания (0,5% при времени считывания 0,12 с), для других форм шкал точность считывания значительно меньше (для круглой — 10%, для линейно-горизонтальной — 27%, для линейно-вертикальной — 35%)

3. Точность и скорость считывания зависят не только от формы шкалы, но и от ее размеров; установлено, что при увеличении диаметра

шкалы точность вначале возрастает, а затем падает; оптимальный диаметр круглой шкалы составляет 40...60 мм; точность считывания с горизонтальных шкал до 150 мм примерно равна точности считывания с круглых шкал, а с увеличением шкал до 250 мм резко падает.

4. Выбор типа и формы шкалы предопределяет также ее назначение: для установки заданной величины параметра рекомендуется применять неподвижные горизонтальные шкалы либо подвижные круглые или полукруглые; для контрольного чтения лучшими являются цифровые счетчики со шкалой типа «открытое окно»; для качественного чтения применяют круглые шкалы с подвижным указателем («больше — меньше»); для поверочного чтения («в допуске — не в допуске») рекомендуется использовать круглые шкалы с движущейся стрелкой и цветовым спектром поля допуска.

Оцифровка шкал включает в себя выбор числа и размеров отметок шкал, шрифта и начертания знаков. Отметки на шкалах чаще всего выполняют в виде штрихов, реже — в виде точек. Они подразделяются на главные, средние и малые. Главные отметки оцифровываются. Оптимальная длина интервала между главными отметками равна 12,5... 18 мм. Высота главных отметок должна составлять 0,5...! от длины интервала между ними, толщина — 0,05...0,1 от него. Выбор числа мелких отметок в основном интервале определяет цену деления. Наилучшими считаются шкалы с ценой деления 1; 5; 10. Минимальный интервал между мелкими отметками равен 1,5 мм, оптимальный — 4...5 мм. Высота мелких делений составляет примерно 0,5 высоты главных. Начертание цифр должно быть простым, с применением прямых линий. Лучшими шрифтами считаются шрифты Макворта и Бергера. Цвет знаков должен резко контрастировать с фоном шкалы, которую рекомендуется выбирать матовой. Обычно применяют черный цвет на матовом фоне, но может применяться и обратное сочетание для прибора при слабой освещенности. Поверхность шкалы не должна быть темнее поверхности панели, в то время как каркас (футляр) индикатора может быть темнее (но не черным и не гладко отполированным).

В других видах индикаторов информация предьявляется как в количественной, так и в качественной формах. В любом случае она предьявляется не в натуральном, а закодированном виде. Под кодированием понимается отождествление условного знака (символа, сигнала) с тем или иным видом информации. Выбор кода связан с получением максимальной скорости и надежности в приеме и переработке информации человеком.

Существует ряд независимых параметров, по которым должны строиться и оцениваться кодовые сигналы: вид алфавита (или категория

кода), длина алфавита, мерность кода, мера абстрактности кода, компоновка кодовых знаков и групп.

Видом алфавита называют способ кодирования информации. Среди многочисленных способов кодирования при конструировании РЭС наиболее часто пользуются условными знаками, буквами, цифрами, цветом и яркостью. При выборе алфавита учитываются многие особенности решения конкретных задач, качественные и количественные характеристики, степень важности и сложности, время поиска, опознания, декодирования и т.д. Кроме этого, конструктор обязательно должен учитывать те знания, которые сложились и прочно закрепились в опыте людей, использующих данную аппаратуру. Это помогает быстрому возникновению ассоциаций и повышает точность кодирования [42, 43].

Цифры используются для количественной оценки, буквы — для передачи информации о названии, цвет — о значимости. Геометрические фигуры применимы для качественных характеристик, когда требуется наглядность при быстрой переработке информации.

В задачах опознания наибольший эффект дает кодирование формой и цветом. Использование цвета обеспечивает минимальное время поиска объекта, тогда как яркость и размер символа требуют больших временных затрат для чтения информации. При использовании в качестве кодов формы, размера, цвета и расположения символов наибольшую наглядность обеспечивают цвет и форма знака.

Под длиной алфавита понимается количество знаков, которое принадлежит тому или иному способу кодирования. Длина алфавита определяет динамический объем характеристик объекта, который можно описать с помощью данного алфавита. Примеры визуальных кодов приведены в табл. 8.3.

Под мерностью кода понимается количество значимых и меняющихся параметров сигнала. С помощью многомерных сигналов можно передать одновременно значительно больше информации, чем с помощью одномерного.

Мера абстрактности кода характеризует приближение кодового знака к кодируемому объекту. Возможны два варианта абстрагирования: абсолютный код, не связанный с содержанием сообщения (рис. 8.4, а), и код, отражающий в большей или меньшей мере физическую сущность объекта (рис. 8.4,б). Мера абстракции кода имеет большое значение при кодировании формой. Высокая точность опознания наблюдается там, где форма знака имеет признаки или характерные черты кодируемого объекта. Например, режим работы генератора можно представить двояко (рис. 8.5). Легко видеть, что сокращение слова и его замена

Таблица 8.3

Код	Пример	Длина алфавита	Использование
Условные знаки		200 - 1000	Отображение качественных характеристик объекта
Буквы и знаки пунктуации	ВХ: УС; РЕГ. УС.	42 (русский алфавит)	
Математические знаки	+ - > ≤ →	15	Отображение аналитических зависимостей, указание операций
Абстрактные математические фигуры	△ ○ ↗	8 - 16	Отображение качественных характеристик объектов
Ориентировка линий в пространстве		12 - 16	Отображение положения объекта в пространстве, его направлений, изменения величины
Цветовой тон		11	Отображение качественных характеристик объекта, тип, принадлежности, состояние
Цифры	1,2,3 ... 0	10	Отображение количественных характеристик объекта, а иногда и качественных
Позиция, число точек		4 - 9	Отображение объекта, состояние
Площадь геометрической фигуры		5	Количественные характеристики объекта (для визуального сравнения)
Тип линии		3 - 5	
Длина линии		4	Отображение контуров траектории движения регулятора
Штриховка		4	Отображение величины для зрительного сравнения
Ширина		3	Отображение типа объекта



Рис. 8.4. Условные знаки с различной степенью абстракции: *a* — полный; *b* — частичный

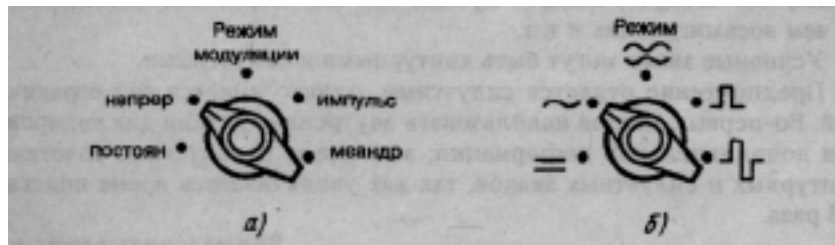


Рис. 8.5. Оформление кодовой группы: *a* — текстом; *b* — символами

на абстрактное изображение амплитуды сигнала ускоряют процесс понимания и, следовательно, улучшают управление прибором:

- непрерывный (непр.) — \sim ;
- постоянный (пост.) — $=$;
- импульсный (имп.) — Π ;
- меандровый (меандр.) — Λ .

Проблема компоновки кодовых знаков возникает тогда, когда кодирование информации ведется несколькими способами. Присутствие сигналов, принадлежащих разным алфавитам на одной лицевой панели, заставляет более строго и внимательно относиться как к их размещению, так и к четкому различию их признаков. Причем требуется, что-

бы разграничение шло не только между способами кодирования, но и по четкой последовательности символов внутри алфавита. Конструктору нужно соблюдать ряд выработанных опытом правил:

основной классификационный знак объекта кодируется контурным знаком, который должен представлять собой замкнутую фигуру;

знак может иметь не только контур, но и дополнительные детали, которые не должны пересекать или искажать основной символ; не следует перегружать знак деталями, кроме того, использование букв снаружи и внутри контура затрудняет чтение знака; предпочтительно использование симметричных символов. Самым универсальным средством представления информации на зрительных индикаторах является кодирование условными знаками. Они обладают самым большим алфавитом различных символов, хорошо используют предшествующий опыт, на который может опираться конструктор при разработке символов. Легко различаются и распознаются простые геометрические фигуры, состоящие из небольшого количества элементов. Фигуры, составленные из прямых линий, различаются лучше, чем фигуры, имеющие много углов и криволинейных элементов. На этом основании треугольник более удобная фигура для кодирования, чем квадрат, квадрат лучше, чем шестигранник, шестигранник — чем восьмигранник и т.д.

Условные знаки могут быть контурными и силуэтными. Предпочтение отдается силуэтным, однако имеется ряд ограничений. Во-первых, нельзя использовать внутренние детали для кодирования дополнительной информации; во-вторых, недопустимо сочетание контурных и силуэтных знаков, так как увеличивается время поиска в 2-3 раза.

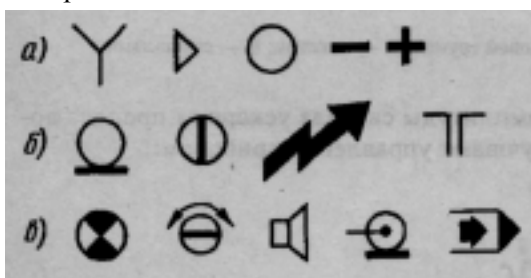


Рис. 8.6. Примеры условных знаков различной сложности

Время считывания условного знака зависит от его углового размера, световых характеристик и сложности. Чем сложнее знак, тем больше времени требуется на его опознание. Принято все множество знаков разделять на три категории: простые (а), средней сложности (б), сложные (в) (рис. 8.6). Из приведенных

примеров видно, что простые знаки имеют для опознания только внешний контур. Знаки средней сложности обладают дополнительными деталями внутри или снаружи контура, а сложные знаки имеют

наружные и внутренние детали. Для чтения условных знаков различной сложности требуются разные предельные угловые размеры и различная величина контраста. Чем сложнее знак, тем больше у него деталей, тем больше контраст требуется для его опознания. Усредненные характеристики знаков приведены в табл. 8.4.

Таблица 8.4

Параметр знака	Простые	Средней сложности	Сложные
Угловой размер контура, минут	18±1	21 + 1	35±2
Угловой размер детали, минут	—	4±1	6±1
Контраст	0,75 ±0,05	0,85	0,9

На рис. 8.6 приведены принятые в нашей стране условные обозначения на органах управления различных радиоустройств [42, 43].

Качественные характеристики информации чаще всего кодируются буквами в виде надписей. Буквы, как и знаки, делятся на простые, средней сложности, сложные. Простые буквы: Г, Л, П, Т, О, С, У, Х; к

знакам средней сложности следует отнести: А, Б, В, З, Е, И, К, Н, Р, Ц, Ч, Э, Ъ; сложными считаются: Д, Ж, М, Щ, Ш, Ю, Ы, Ь, И, Ф, Я.

Для выполнения надписей на приборах существуют специальные шрифты [44]. Наиболее распространенным для выполнения надписей на лицевых панелях является прямой рубленый шрифт (ГОСТ 2330-76, ГОСТ 3489-71).

Для улучшения внешнего вида прибора конструктор может отказаться от формально-равнодушного рубленого шрифта и использовать так называемые свободные стилизованные шрифты. Обычно их используют в рекламных целях для оформления бытовой аппаратуры. Примеры таких шрифтов представлены на рис. 8.7 и 8.8.

Пояснительные надписи могут выполняться полностью, сокращенно или в виде аббревиатур. Одна и та же надпись должна быть либо полной, либо сокращенной. По возможности ее следует делать максимально краткой, но понятной. Если делается сокращение, то оно должно заканчиваться согласной буквой. Сокращается столько букв, сколько необходимо для сохранения в оставшейся части смысла слова. Другими словами код должен быть таким, чтобы его нельзя было спутать с общепринятыми и другими сокращенными словами. Например, ВКЛЮЧЕНИЕ — ВКЛ, АВТОМАТ — АВТ, КАЛИБРОВКА — КАЛИБР. Надписи аббревиатуры составляются из начальных букв слов, составляющих полное наименование прибора или объекта: ВТОРИЧНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ — ВИП, ГЕНЕРАТОР СТАНДАРТНЫХ СИГНАЛОВ — ГСС.

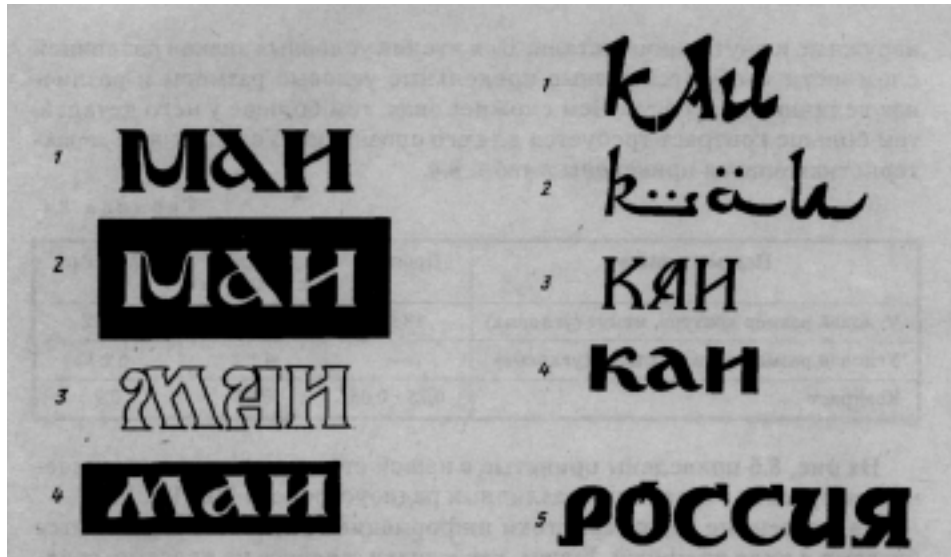


Рис. 8.7. Примеры стилизованных надписей: 1 — славянский устав, прямой контраст; 2 — славянский устав, обратный контраст; 3 — русский сувенир, контурное начертание; 4 — стилизация полуустава, обратный контраст

Рис. 8.8. Примеры надписей в национальном стиле: 1 — арабский; 2 — стилизация арабского; 3 — старославянский; 4 — полуустав; 5 — украинский

Можно пользоваться буквенными сокращениями надписей, образованных из сложных слов. В этом случае в аббревиатуру включаются первые буквы корней, составляющих сложное слово: РАДИОКОМПАС — РК,



ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА — ВАХ, ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ — ШИМ. Правила сокращения и составления подобных надписей регламентируются [45].

К надписям разрешается добавлять обозначение физических величин, цифры, условные знаки: СЕТЬ -220 В или -220 В, ВЫСОКАЯ ЧАСТОТА или ВЧ.МГЦ, ОСЛАБЛЕНИЕ или ОСЛАБ.ДБ (рис. 8.9).

Рис. 8.9. Примеры оформления надписей, содержащих буквы — цифры — символы

Надписи наносятся в непосредственной близости от соответствующего органа управления, индикации или коммутации в удобном для чтения месте. Предпочтительно горизон-

тальное расположение над элементом, к которому относится надпись, или на самом торце (рис. 8.10).

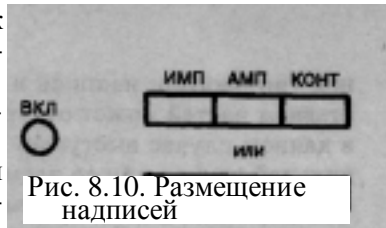


Рис. 8.10. Размещение надписей

Цифры на лицевой панели выполняются по тем же правилам, что и буквы. Важным условием различимости букв и цифр является выбор их формы. При разработке шрифта конструктор, прежде всего, должен избегать сходных знаков и

выделять характерные признаки, отличающие цифры друг от друга. Арабский цифровой алфавит состоит из знаков, многие из которых не удовлетворяют требованиям хорошей различимости. Такие цифры, как 7 и 9, 5 и 6, 3 и 5 отличаются друг от друга только одним или двумя признаками. Поэтому возможны ошибки при их чтении. Хорошо различаются цифры: 1, 2, 4, 8, 0. Такие цифры, как 1, 4, 7 имеют в своем составе прямые линии, которые обеспечивают наибольшую скорость и точность опознания. Чтобы исключить ошибки при чтении и написании, используются специальные конфигурации цифр. Так, читаемость и опознание цифр зависят от взаимного расположения линий, образующих знак. Наличие острых углов и прямых линий ускоряет процесс опознания, поэтому легче и быстрее опознаются цифры, образованные прямыми линиями, например шрифт Бергера (рис. 8.11, а). При написании цифр удобно пользоваться волнистыми линиями и по возможности отказаться от резких перепадов в форме, например острых углов. Примером удобного для написания шрифта является шрифт Макворта (рис. 8.11, б). Если цифровой код предъявляется с высокой частотой, целесообразно каждой цифре придавать неповторимую форму и максимальное количество признаков отличия. Таким требованиям отвечает шрифт Слейта (рис. 8.11, в).

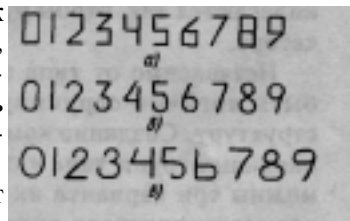


Рис. 8.11. Способы начертания цифр: а — шрифт Бергера; б — шрифт Макворта; в — шрифт Слейта

8.5. Выбор формы, композиции, фактуры и цвета лицевой панели

Под композицией лицевой панели понимается расположение, соотношение, сочетание основных элементов и частей формы лицевой панели, выполненные в определенной последовательности и придающие ей законченный целостный вид. Основными элементами и частями формы здесь, прежде всего, являются площади и формы, занимаемые функциональными группами. Функциональная группа может быть пол-

ной (индикатор, надпись и регулятор) и неполной, когда одна из составных частей может отсутствовать. Надпись (условный знак, символ) в данном случае выступает как элемент формы, аналогично функциональной группе или ее элементу: регулятору, индикатору [46].

Расположение этих элементов, прежде всего, определяется удобством получения информации и выполнения ответных действий. Не менее важно обеспечить благоприятное эмоциональное восприятие прибора в целом, сделав соответствующее декоративное оформление частей прибора и, прежде всего, лицевой панели. Правильное расположение элементов формы должно соответствовать быстрому определению, какие органы управления и индикации взаимосвязаны, какое состояние может вызвать каждый орган управления. Оператор должен в любой момент легко узнать, в каком режиме находится работающий прибор, каковы величины параметров. Поэтому ручные органы управления располагаются так, чтобы рука не закрывала рядом расположенного индикатора.

Независимо от типа органов управления и индикации они должны быть логично сгруппированы в определенную пространственную структуру. Создание композиции начинается с формирования функциональных групп типа «индикатор-символ-регулятор». Формально возможны три варианта их взаимного расположения: регулятор относительно индикатора расположен снизу, слева, справа. Располагая эти группы определенным образом на лицевой панели и выравнивая, соподчиняя расположение элементов этих групп между собой, конструктор строит композицию наиболее удобными ему методами итерационных стратегий или последовательных приближений. Важно отметить, что построение композиции — многоитерационный процесс, основанный не только на использовании закономерностей красоты и гармонии, но и на просмотре большого количества вариантов размещения по функциональному признаку.

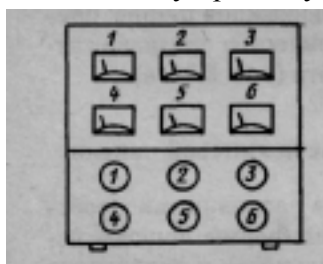


Рис. 8.12.
Размещение регуляторов и индикаторов на отдельных панелях

Возможны следующие варианты размещения: горизонтальными рядами, вертикальными рядами, комбинированный способ. При любом варианте каждый регулятор располагается непосредственно под связанным с ним индикатором: справа — для правой руки, слева — для левой руки. Если управлять можно любой рукой, то используется симметричное расположение индикатора и регулятора. При размещении регуляторов и индикаторов на разных панелях (рис. 8.12) необходимо, чтобы:

органы управления занимали положение, соответствующее положению связанных с ними индикаторов;

панели с регуляторами и индикаторами не размещались друг против друга,

все индикаторы, располагались сверху, а органы управления — внизу.

Если конструктор затрудняется выполнить перечисленные требования, то он может сгруппировать регуляторы и индикаторы по функциональному признаку, выделив на панели зоны цветом или контурными линиями. При этом нельзя располагать рядом органы управления для текущей работы и аварийных ситуаций. В случае применения концентрических поворотных ручек, связанных с индикаторами (рис. 8.13): центральная ручка управляет крайним левым индикатором, средняя — средним, периферическая — крайним правым.

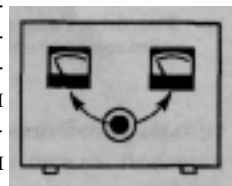
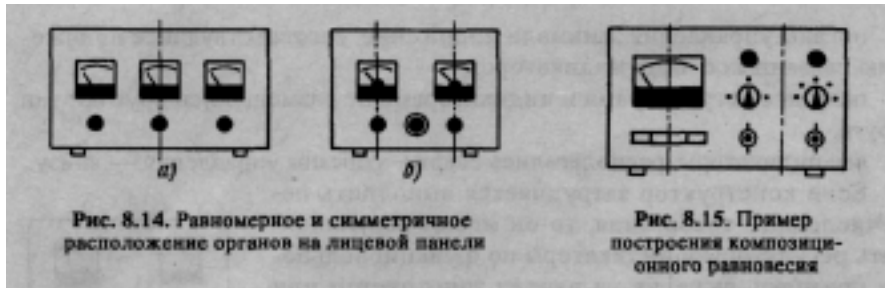


Рис. 8.13. Размещение индикаторов и концентрических ручек

Декоративное оформление лицевой панели основано на знании и использовании законов композиции. Из композиционных средств отбирают те, которые нужны для придания устройству нарядного законченного вида. Следует сразу заметить, что композицию нельзя рассматривать как заранее заданную форму или определенный набор рецептов, в соответствии с которыми будут решаться задачи оформления конструкции РЭС. Всегда существуют десятки возможных вариантов для возможного размещения одних и тех же элементов. Основную задачу при выборе композиции лицевой панели можно сформулировать, как стремление добиться такой организации элементов, которая, не нарушая функциональных характеристик устройства и его назначения, позволила бы придать этому устройству целостность — единство, в котором второстепенные детали подчинялись бы главному. Для выполнения такой задачи используется ряд средств выразительности: равновесие, контраст, ритм, масштаб, пропорции.

Обязательным условием правильного построения композиции служит равновесие в расположении отдельных элементов и частей лицевой панели. В его основе лежит правило равномерного распределения элементов на площади панели или на одинаковом расстоянии друг от друга (рис. 8.14). Выразительную форму образует равновесие, построенное на соразмерности отдельных частей поверхности. Например, на рис. 8.15 стрелочный индикатор слева уравновешивается несколькими органами управления справа.

Равновесие формы — это такое состояние, при котором все элементы сбалансированы между собой и разрабатываемая конструкция зри-



тельно устойчива. Применительно к задачам конструирования лицевых панелей можно сказать, что конструктором решается задача поиска графического равновесия на плоскости. Она имеет две разновидности: поиск композиционного равновесия в симметричных формах; поиск композиционного равновесия в асимметричных формах. Симметрия формы — наиболее яркое и наглядное свойство композиции и наиболее активная ее закономерность. Простейший вариант симметричной композиции представлен на рис. 8.14. На лицевой панели в виде прямоугольника проводится вертикальная главная ось, относительно которой на равном расстоянии располагаются элементы формы. Может случиться, что прибор не имеет главной оси. Вместо нее существуют две или более соподчиненных осей, относительно которых ищется равновесие при размещении. Из приведенных примеров видно, что при симметрии формы композиционное равновесие достигается наиболее просто, так как наличие осей симметрии уже создает предпосылки к равновесию.

Однако все многообразие компоновочных вариантов и элементной базы нельзя зажать в рамки симметричных форм. В силу условий функционирования и особенностей конструкции или электрической схемы конструктору приходится отказываться от симметрии и искать композиционное равновесие в асимметричных формах. Пример такого подхода представлен на рис. 8.16. Плоскость лицевой панели условно разрезается на четыре части, в каждой из которых решается задача композиционного равновесия при соподчиненности с другими частями прибора. Это достигается организацией горизонтальных рядов органов. Равновесие верхней части достигается тем, что экран второй части уравновешен группой индикаторов по площади первой

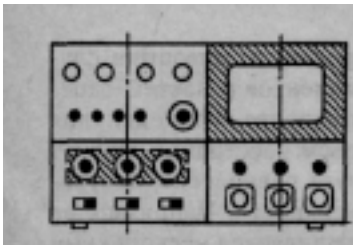


Рис. 8.16. Композиционное равновесие в асимметричных формах

части. Наличие четвертого индикатора создает элемент асимметрии, который смотрится не ошибкой формообразования, а скорее средством особой выразительности, индивидуальности данной разработки. В данном случае композиционная уравновешенность обеспечивается за счет незначительного отступления от симметрии. При существенных отступлениях проблема зрительного равновесия становится исключительно сложной, и таких ситуаций стремятся избежать даже опытные конструкторы.

В этом примере демонстрируется еще одно правило. Если какая-то приборная панель построена на основе принципа симметрии в расположении основных элементов, то нужно стремиться к его последовательному отражению в деталях. Если в какой-либо части или группе асимметрия неизбежна, то следует четко и определенным образом это выразить.

Форма и отношения «симметрии — асимметрии» настолько многообразны, что трудно сформулировать и установить даже приближенные правила решения этой проблемы. В конкретных проектных ситуациях многое зависит от того, насколько активна ось симметрии, какова роль композиционного построения по принципу несимметричного зеркального отражения элементов. Асимметрия формы для многих радиоаппаратов — такой же объективный результат решения функциональной задачи, каким является симметрия для других. Неправомерно утверждать, что симметричная композиция в чем-то лучше асимметричной. С помощью симметрии легче и проще достигается зрительная устойчивость прибора, но это не гарантирует гармонии так же, как и асимметрия не означает дисгармонии. В качестве примеров выбора асимметричной формы композиции рассмотрим варианты лицевой панели на рис. 8.17. Верхние ряды элементов выполнены в духе строгой симметрии. Проблема возникает при размещении элементов в нижнем ряду, который не укладывается в схему верхних рядов и создает элементы асимметрии.

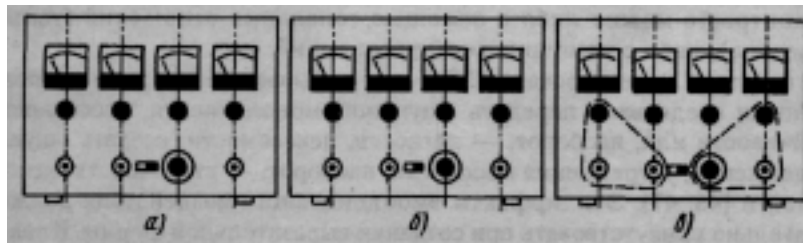


Рис. 8.17. Анализ композиционного равновесия в асимметричных формах

В варианте *a* наиболее четко организована панель. Композиционное равновесие достигается выделением четырех функциональных групп через соподчиненные оси. В варианте *b* сделана попытка выделить главную ось, проходящую через регулятор. Однако при этом нарушается соподчиненность элементов по третьей вспомогательной оси. По сравнению с вариантом *a* — это более весомый недостаток как зрительно, так и функционально. В целом эта компоновка уравновешена, хотя и уступает варианту *a*.

В варианте *b* ради зрительной симметрии нарушена соподчиненность по 2-й и 3-й осям. Второй регулятор слева образовал случайную группу с элементами по 1-й оси, а второй регулятор справа — с элементами по 4-й оси. Такое решение явно неудачно, поскольку нарушена соподчиненность элементов по функциональному признаку. По этой причине вариант *b* оказался самым неудачным из всех трех.

Для подчеркивания тоновых, цветовых и других противоположностей пользуются контрастом. Это одно из главных средств композиции в технике. Контраст основан на противопоставлении: низкое — высокому, горизонтальное — вертикальному, светлое — темному, шероховатое — гладкому. Такое противопоставление делает само по себе форму более заметной, выделяя ее среди других. В большинстве случаев лицевая панель — плоскость прямоугольной формы. Здесь контраст никак не проявляется: слишком скучна и невыразительна форма. Она предельно лаконична и без дополнительных средств выразительности становится схематично-примитивной. В этом случае требуется введение искусственного контраста, который активизировал бы форму. Например, можно прямоугольник расчленить на несколько частей с помощью контрастного сочетания цветов или выделить определенную функциональную группу с помощью дополнительных контурных линий. Различают контраст общий и локальный. При общем выделяется одна из зон, например зона индикации, как показано на рис. 8.18. При локальном контрасте внутри функциональной группы происходит тональное или контурное выделение ее элементов (рис. 8.19, 8.20). Усилить впечатление контраста можно либо с помощью тональных отношений (темное — светлое), либо с помощью контурных линий.

В практике проектирования РЭС иногда бывает необходимо композиционными средствами передать ощущение монолитности, массивности, устойчивости или, наоборот, — легкости, невесомости; создать ощущение движения, устремления массы или, наоборот, — статичности, неподвижности [46, 47]. Эти эффекты эмоционального воздействия должны обязательно присутствовать при создании выразительной формы. К таким средствам относится ритм — закономерное чередование одинаковых или сопоставимых элементов формы. Так, на рис. 8.21, а ритм проявляется в

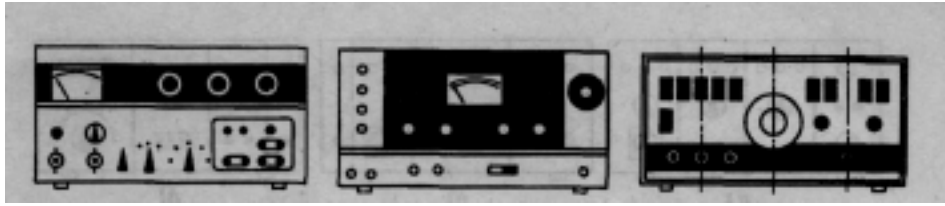


Рис. 8.18. Общий контраст на лицевой панели высоко- раст на лицевой панели для стабильного источника тока выделения функциональной группы с помощью контурных линий в калибраторе постоянного тока

Рис. 8.19. Локальный контраст на лицевой панели для выделения функциональной группы с помощью контурных линий в калибраторе постоянного тока

Рис. 8.20. Локальный контраст, образованный кнопками управления низкочастотного генератора

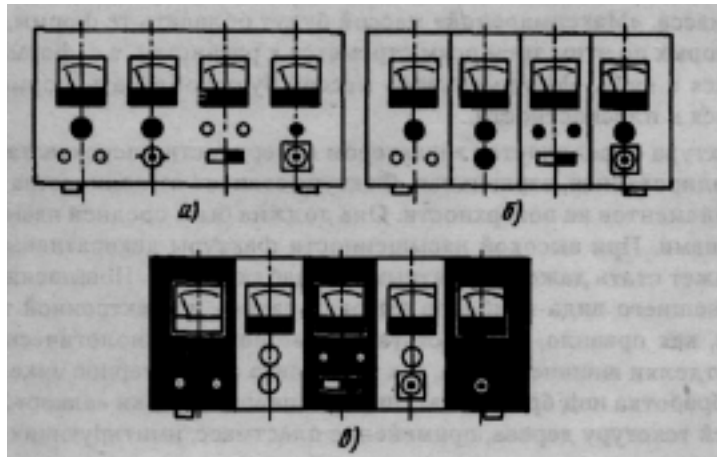


Рис. 8.21. Общий ритм на лицевой панели: *а* — слабо выраженный ритм; *б* — ритм, усиленный контурными линиями; *в* — равномерный ритм при чередовании светлых и темных зон

разделении лицевой панели на четыре вертикальные зоны. Чтобы усилить впечатление ритма, зоны можно выделить контурными линиями (рис. 8.21, *б*), как чередование темных линий и светлых полей, или использовать чередование светлых и темных тонов окраски (рис. 8.21, *в*). Наиболее простая форма ритма — равномерная (рис. 8.22, *а*); прямоугольник панели воспринимается как статический. Изменяя ширину зон, мы можем вызывать ощущение направленности, движения (рис. 8.22, *в*) или важности сектора в управлении прибором (рис. 8.22, *б*). Можно организовать более сложный ритм, в котором происходит чередование трех и более элементов формы, или локальный ритм с чередованием элементов формы в пределах зоны или части панели, как показано на рис. 8.20.

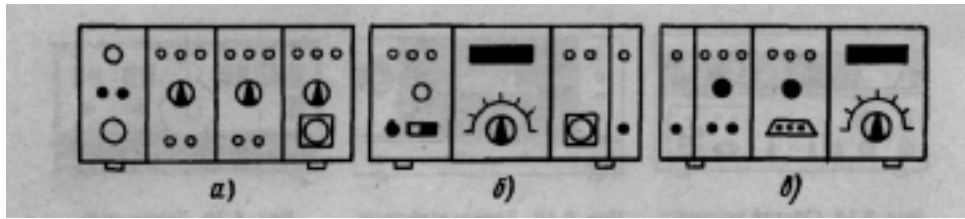


Рис. 8.22. Общий ритм, образованный контурными линиями: *а* — равномерный; *б* — центральный; *в* — направленный динамический

Радиоаппаратура имеет, как правило, объемные, а не плоские формы. С изменением формы изделия по трем ее координатам изменяется

и его масса. «Максимальной» массой будут обладать те формы, размеры которых по этим трем осям стремятся к равенству, т.е. формы, стремящиеся к кубу. «Минимальной» массой будут обладать формы, стремящиеся к плоскостности.

Фактура определяется характером поверхности: шероховатая, гладкая, полированная, зеркальная. Фактура зависит от количества и величины элементов на поверхности. Она должна быть средней насыщенности тонами. При высокой насыщенности фактуры декоративный рисунок может стать даже неприятным для наблюдателя. Повышению качества внешнего вида приборов бытовой радио- и электронной техники сейчас, как правило, способствуют такие новые технологические способы отделки внешнего вида, как полировка огнем, черное никелирование, обработка под бронзу, латунь, применение пленки «алкор», имитирующей текстуру дерева, применение пластмасс, имитирующих текстуру кожи и др.

Отношения размеров (пропорции) играют также весьма значительную роль при конструировании радиоприборов. Ранее большая часть изделий имела лицевую панель с органами управления и индикаторными устройствами, выполненными по так называемому «золотому сечению», равному отношению 1:0,62. Сейчас все больше распространение получают иррациональные отношения, основанные на аддитивном ряде чисел Фибоначчи, из которых наиболее часто встречающимися являются пропорции 1:0,583 и 1:0,553, т.е. форма становится более планарной. Следует отметить, что, создавая в конструкциях устройств контраст форм и размеров, можно добиться более высокой динамичности формы и «уйти от куба». Важным фактором в создании наиболее удачной формы изделия является масштабность конструкции изделия, которая оценивается величиной ее архитектурной формы по отношению к человеку. Основной мерой масштабности радиоаппаратуры являются ее органы управления. Так, например, масштабность многих микрокалькуля-

торов определяется количеством и размерами кнопок управления, а масштабность телевизоров — размерами экрана.

Проблемой цветового решения издавна занимались художники, философы, физики, психологи, искусствоведы [49]. Как правило, все цвета делятся на ахроматические (белый, черный, серый) и хроматические (красный, зеленый, желтый, голубой и др.). Разбавление какого-либо спектрального цвета ахроматическим создает определенный тон и насыщенность цвета. Тон и насыщенность определяют лишь качественную характеристику цвета — цветность, но не определяют количественную — яркость. Наиболее полно отвечает требованиям художественного конструирования по использованию цвета теория согласования цветов [50]. Цвет имеет большое влияние на психологическое состояние человека. Красный цвет повышает эмоции, голубой — успокаивает, зеленый — освежает, оранжевый — вызывает радость, фиолетовый — печаль, черный — угнетает. Но если черный цвет применяется в сочетании с другими, то создается резкое ощущение контраста. Кроме того, цвет в нашей обычной жизни служит хорошим информатором. Существует три наиболее «фокусирующих» внимание цвета: красный, желтый и зеленый. Для контрастного их восприятия используются полярные ахроматические цвета: белый и черный. Красный цвет употребляют для предупреждения, быстрого включения и выключения аппаратуры. Желтый характеризует «тепло», особенно хорошо сочетается с черным обрамлением и используется для окраски корпусов контрольно-измерительных производственных приборов. Часто применяют также желто-оранжевый или золотисто-желтый цвет.

При выполнении экспериментально-измерительных работ, в особенности исследовательских (т.е. в течение части рабочего дня), наиболее приемлемы не «теплые» экстенсивные тона, а, наоборот, «холодные» (синий, голубой, серый), способствующие лучшему умственному восприятию и осмысливанию результатов исследования. При выборе цветового решения радиоприборов не следует увлекаться использованием большого количества цветов: обычно выбирают 2-3 основных цвета средней насыщенности и разделяют их на «зоны» с помощью белых или черных линий.

9. КОНСТРУИРОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ И НЕСУЩИХ ОСНОВАНИЙ РЭС

9.1. Расчет геометрических размеров коммутационных оснований

Коммутационными основаниями микросборок являются подложки, на которых устанавливают бескорпусные компоненты (кристаллы ИС,

миниатюрные ЭРЭ с тонкими плоскими выводами или безвыводные), а коммутацию между ними и пленочными элементами выполняют методами тонко- и толстопленочной технологии. При тонкопленочной технологии наибольшие линейные размеры имеет базовая пластина (подложка) размером 60x48 мм. Более мелкие подложки получают разрезанием (скрайбированием) базовой пластины на кратные части. Например, из базовой подложки можно получить четыре более мелких с размерами 24x30 мм, проводя линии разрезов посередине каждой стороны базовой пластины. Для толстопленочных подложек наиболее характерным типоразмером является плата 24x36 мм.

Коммутационными основаниями функциональных ячеек РЭС являются печатные платы, линейные размеры которых оговорены ГОСТ 10317-79 и приведены в табл. 9.1.

Расчет геометрических размеров коммутационных оснований сводится к решению двух задач (прямой и обратной):

по заданному количеству комплектующих элементов определить линейные размеры основания, на котором они могут быть размещены, и по результатам расчета подобрать рекомендуемые размеры подложек или печатных плат;

по заданным линейным размерам коммутационных оснований определить возможное количество комплектующих элементов на площадках с такими размерами.

Геометрические размеры подложки микросборки зависят от ее назначения и типа МСБ (цифровой, аналоговой, силовой и тонко- или толсто пленочной).

Для расчета длины A и ширины B тонкопленочной платы МСБ цифрового типа (рис. 9.1, а) необходимо знать размеры посадочного места a_0 и b_0 бескорпусной ИС, число микросхем i по оси x и y по оси y , число задействованных выводов $n_{\text{выв}}$ от кристалла ИС, величину краевого поля Δ_k , а также разрешающую способность D трассировки платы (минимальные ширину проводников и зазор между ними). Размеры посадочного места бескорпусной ИС с проволочными выводами определяются из рис. 9.1,б:

$$a_0 = a + 2(l + m), b_0 = b + 2(l + m), \quad (9.1)$$

где a, b — размеры кристалла ИС в плане, мм; l — минимальное расстояние от кристалла до края внутренней контактной площадки, мм: $l > 0,8$ мм; m — ширина внутренней контактной площадки, мм: $m \geq 0,4$ мм при пайке, $m > 2$ мм при сварке; n — ее высота, мм: $n > 0,3$ мм при пайке, $n > 0,15$ мм при сварке.

Таблица 9.1

Ширина	Длина	Ширина	Длина	Ширина	Длина	Ширина	Длина	Ширина	Длина	Ширина	Длина	
10*	10*	45*	45*	80*	80*	100*	200	140*	140*	180*	180*	
	15		50		85		240		150		190	
	20*		60		90*		280		160*		200*	
	30		70		95		110		170		220	
	40		75		100*		ПО		180*		240*	
15*		50*	80*	85	ПО	120*	120	150	190	200*	260	
	15		85		120*		130		200*		280*	
	20		90		130		135		220		300	
	25		170		140		140		240*		320*	
	30				150		150		260		340	
20*		60*	50*	90	160*	120*	160	160*	280*	200*	360*	
	20*		60*		180		170		320			
	25		75		200		180		360		200*	
	30*		80*		240		190		150		220	
	40*		85				200		150		240*	
	45		90*		85		220		160		260	
	50		95		90		120*		170		280*	
	60		100		95		120		180		300	
	80				100		130		190		320*	
30*		75*	60*	100*		130	140*	160*	200	220	340	
	30*		75		90*		150		300		360*	
	40*		80*		95		160*		160*		220	
	45		85		100*		170		160*		220	
	50		90*		ПО		180		170		240	
	60*		95		120*		190		180*		260	
	80		100*		130		200*		190		280	
	90		ПО		140*		220		200		300	
			120*		150		240*		220		320	
40*	40*	75*	140	100*	160*	130	280	160*	240*	240*	340	
	45		160		170		320		260		360	
	50*		180		180*		360		280		240*	
	60						130		300		240*	
	75		75		100*		130		320		260	
	80*		80		ПО		140		360		280*	
	100		85		120*		150		170		300	
	120		90		130		170		170		320*	
	140		95		140*		180		175		340	
	160		100		150		190		180		360*	
			170		160*		200		190			
					170		260		200			
					180*		135		240		340	
					190							

* Предпочтительные размеры

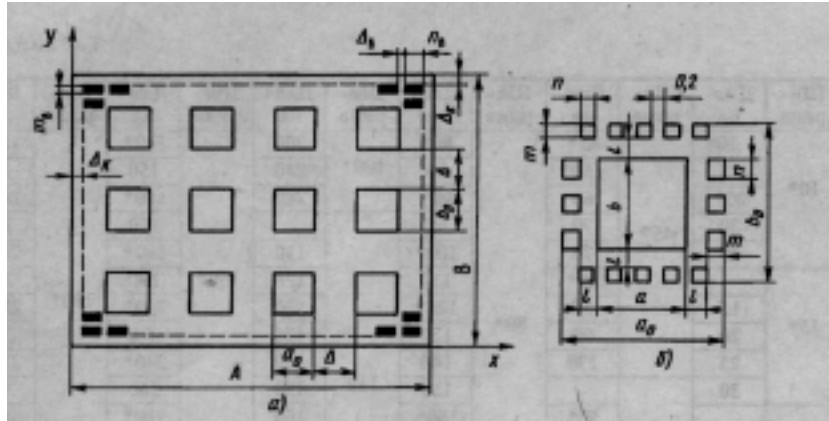


Рис. 9.1. Геометрия платы МСБ: *a* — собственно платы; *b* — посадочного места бескорпусной ИС

Для бескорпусной ИС с шариковыми выводами $a_0 = a$ и $b_0 = b$.

Размеры кристаллов ИС берут из технических условий. Заметим, что длина $n_в$, ширина $m_в$ и зазор между внешними контактными площадками выбирают равными 0,45; 0,4 и 0,2 мм при шаге между ними 0,625 мм и 1,0; 0,4 и 0,2 — при 1,25 мм. Для расчета зазора Δ между посадочными местами микросхем было принято ориентировочно, что от верхних рядов ИС к верхним внешним контактными площадкам МСБ (при $j \leq 4 \dots 5$) в зазоре от соседних двух ИС проходят $n_{выв}$ проводников, от нижних к нижним такое же количество, а остальные связи, осуществляющие последовательную передачу сигналов от ИС к ИС, расположены между ними по горизонтальной оси x с помощью перемычек через более широкие контактные площадки. Если принять такое допущение, то величина зазора будет складываться из ширины $n_{выв}$ проводников и $(n_{выв} + 1)$ расстояний между ними, т.е.

$$\Delta = (2n_{выв} + 1)\Delta_p. \quad (9.2)$$

Величина краевого поля $\Delta_к$ равна 1,35 мм. Тогда геометрические размеры площади платы для цифровой МСБ, изготовленной по тонкопленочной технологии, определяются как

$$A = a_0i + \Delta(i+1) + 2\Delta_к, \quad (9.1)$$

$$B = b_0j + \Delta(j+1) + 2\Delta_к.$$

Пример 9.1. Определить длину и ширину ситалловой коммутационной платы для размещения 12 бескорпусных ИС серии 706.

Используем данные ТУ на ИС: $a = b = 1,5\text{мм}$; $l \geq 0,8\text{мм}$; $m \geq 200$ мкм (при сварке), тогда получим $a_0 = b_0 = 3,5\text{мм}$. Примем разрешающую способность тонкопленочной технологии для нашего случая $\Delta_p = 0,1$ мм, а число задействованных выводов $n_{\text{выв}} = 12$, тогда $\Delta = 2,5\text{мм}$. Микросхемы расположим на подложке в следующем порядке: число строк $i = 4$, число столбцов $l = 3$ (см. рис. 9.1, а). Тогда

$$A = 3,5 \cdot 4 + 2,5 \cdot (4+1) + 2 \cdot 1,35 = 29,2\text{мм},$$

$$B = 3,5 \cdot 3 + 2,5 \cdot (3+1) + 2 \cdot 1,35 = 23,2\text{мм}.$$

Выбираем типоразмер 30x24 мм.

Для расчета геометрических размеров многослойной толстопленочной МСБ цифрового типа можно пользоваться формулами (9.1—9.3), но при этом принять $\Delta = \Delta_k = 1,35\text{мм}$.

Расчет геометрических размеров тонкопленочных плат аналоговых и силовых МСБ основан на определении требуемой площади платы под размещение активных компонентов и пассивных элементов схемы:

$$S = q_s \{ \sum S_R + \sum S_C + \sum S_L + \sum S_K + \sum S_{КП} \}$$

где S_R , S_C , S_L , S_K , $S_{КП}$ — площади напыленных резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, навесных дискретных компонентов (бескорпусных аналоговых микросхем, транзисторов, диодов, конденсаторов) и контактных площадок; q_s — коэффициент дезинтеграции площади, равный 1,5...2,5.

Размеры тонкопленочных плат, кратные от деления базовых сторон 60x48 мм, могут быть выбраны из рекомендованного ряда табл. 9.2 по найденному значению площади.

Таблица 9.2

$S, \text{см}^2$	14,4	7,2	4,8	3,6	3,2	2,4	1,8
$A \times B, \text{мм}$	48x30	48x15 30x24	30x16 24x20	30x12 24x15	20x16	16x15	15x12 j

Расчет геометрических размеров печатных плат (длины L_x и ширины L) проводится по следующим формулам [17] в случае размещения соединителя вдоль оси x (рис. 9.2):

$$L_x = (n_x - 1)t_x + l_x + x_1 + x_2,$$

$$L = (n - 1)t + l + y_1 + y_2,$$

где n_x, n_y — число микросхем (микросборок), размещаемых соответственно по осям x и y ; t_x, t_y, l_x, l_y — шаги их установки и размеры их посадочных мест по этим осям; x_1, x_2 — краевые поля платы по оси x , зависящие от толщины печатной платы, типа корпуса и его ориентации на плате; y_1 — краевое поле для размещения соединителя; y_2 — краевое поле для размещения контрольной колодки (если она имеется).

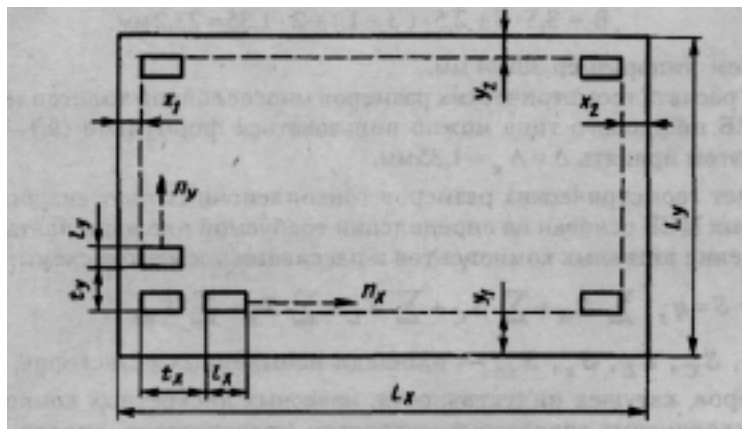


Рис. 9.2. Геометрия печатной платы

Все данные по геометрическим величинам, используемые при расчете, находятся по табл. 3.2, 3.5, 3.10.

В случае размещения соединителя вдоль короткой стороны платы формулы имеют вид

$$L_x = (n_x - 1)t_x + l_x + y_1 + y_2,$$

$$L_y = (n_y - 1)t_y + l_y + x_1 + x_2,$$

Пример 9.2. Подобрать рекомендуемый стандартный размер печатной платы толщиной 2,0 мм с установленными на ней 48 микросхемами серии K155 (корпус 201.14-1) и соединителем типа ГРПМ9-У вдоль большей стороны платы. Контрольная колодка отсутствует. Число задействованных выводов от корпуса - 12, ориентация выводов корпуса на плате — горизонтальная. По табл. 3.2 находим $l_x = 6,8\text{мм}, l_y = 19,5\text{мм}, t_x = 17,5\text{мм}, t_y = 25\text{мм}, x_1 = x_2 = 5\text{мм}, y_1 = 20\text{мм}$; соответственно $n_x = 8$ и $n_y = 6$. Геометрические размеры платы:

$$L_x = (8-1) \cdot 17,5 + 6,8 + 5 + 5 = 139,3 \text{ мм};$$

$$L_y = (6-1) \cdot 25 + 19,5 + 20 + 5 = 169,5 \text{ мм}.$$

Выбираем плату с размерами 140x 170 мм, почти точно совпадающими с расчетными. Если этого совпадения нет, то надо брать типоразмер с большим, чем расчетные, размерами из табл. 9.1.

9.2. Выбор материалов и расчет элементов печатных плат

В настоящее время существует широкий ассортимент материалов, используемых для изготовления печатных плат. Это вызвано стремлением обеспечить высокие конструкторско-технологические и экспериментальные показатели. Для РЭС, работающих в условиях нормального климата при средней плотности монтажа, наибольшее применение находят фольгированные материалы, такие как гетинакс, стеклотекстолит и др.

Перечень основных материалов печатных плат и области их применения представлены в табл. 9.3.

Расчет элементов печатных плат состоит из конструкторско-технологического расчета и расчета по постоянному току.

Целью конструкторско-технологического расчета является определение геометрических размеров основных элементов с учетом производственных погрешностей рисунка проводников, фотошаблона, базирования, сверления и т.п.

Расчет по постоянному току сводится к получению ограничений на ширину сигнальных проводников, шин питания и земли по критериям допустимого падения напряжения на сопротивлении проводника и плотности протекающего тока. В более сложном варианте задача расчета печатных плат по постоянному току формулируется как задача оптимизации ширины проводников питания и земли путем поиска оптимального размещения интегральных микросхем на плате [36].

Результаты конструкторско-технологического расчета и расчета по постоянному току элементов печатных плат используются в качестве ограничений при проектировании плат.

9.2.1. Конструкторско-технологический расчет элементов печатных плат

Основными элементами печатных плат являются проводники, контактные площадки, монтажные и переходные отверстия. Качество печатной платы зависит от размеров самих элементов и размеров их взаимного расположения. Номинальные значения этих размеров для узких

Таблица 9.3

Название	Марка	ТУ, ГОСТ	Толщина, мм	Применение
Гетинакс фольгированный гальваностойкий	ГФ1, ГФ2	ГОСТ 10316-78	1,0 ... 3,0	ПП для РЭС широкого применения до 85°С
Гетинакс фольгированный общего назначения гальваностойкий	ГОФ1, ГОФ2	ТУ 16-503.195-83	1,0... 3,0	ПП для РЭС широкого применения до 85°С
Гетинакс фольгированный общего назначения влагостойкий	ГОФВМ2 ГОФВМ1	ТУ 16-503.195-83	1,0 ... 3,0	ПП для РЭС широкого применения до 85°С
Стеклотекстолит фольгированный гальваностойкий	СФ1, СФ2	ГОСТ 10316-78	0,5 ... 3,0	ПП с повышенными диэлектрическими свойствами до 85° С
Стеклотекстолит фольгированный нагревостойкий	СФ1Н, СФ2Н	ГОСТ 10316-78	0,5 ...3,0	ПП с повышенными диэлектрическими свойствами до 100° С
Стеклотекстолит фольгированный общего назначения негорючий	СОНФ1 СОНФ2	ТУ 16-503.204-80	0,5 ... 3,0	ПП для РЭС широкого применения до 85°С
Диэлектрик фольгированный тонкий (нетравящийся)	ФДМ1, ФДМ2 ФДМЭ1.2	ТУ 16-503.084-77	0,2 ...0,33 0,1... 0,15	МПП для микроэлектроники
Диэлектрик фольгированный травящийся	ФТС1, ФТС2	ТУ 16-503.154-76	0,08 ... 0,5	МПП с помощью метода сквозных отверстий
Стеклотекстолит фольгированный теплостойкий	СТФ1, СТФ2	ТУ 16-503.161-83	0,1 ...3,0	Изготовление ПП и МПП различными методами
Стеклотекстолит теплостойкий для полуаддитивной технологии	СТПА-5-1 СТПА-5-2	ТУ 16-503.200-80	0,1 ... 2,0	Изготовление ПП и МПП методами полуаддитивной технологии
Стеклотекстолит листовой с адгезионным слоем	СТЭК	ТУ 16-503.202-83	0,3 ... 3,0	Изготовление ПП по аддитивной технологии
Слофадит	—	ТУ 16-503.202-83	0,3 ... 3,0	Изготовление ПП с плотным монтажом до 120°С
Лавсан фольгированный	ЛФ1, ЛФ2	ТУ 16-503.196-80	0,115... 0,18	Для МПП и гибких ПП до 85° С
Полиимид фольгированный	ПФ1, ПФ2	ТУ 16-503.208-81	0,05 ... 0,125	Для МПП и гибких ПП до 250°С

мест определяют класс точности печатной платы (табл. 9.4) и могут быть обеспечены при производстве. Расчетные значения размеров элементов печатной платы выбранного класса должны соответствовать данным табл. 9.4 и быть согласованы с технологическими возможностями конкретного производства.

Таблица 9.4

Наименование элемента	Размеры элемента для класса			
	1	2	3	4
1. Ширина проводника b_n , мм	0,6	0,45	0,25	0,15
2. Расстояние между проводниками t , мм	0,6	0,45	0,25	0,15
3. Ширина пояска контактной площадки наружного слоя b_n мм	0,3	0,2	0,1	0,05
4. Ширина пояска контактной площадки внутреннего слоя $b_{вн}$ мм	0,15	0,1	0,05	0,03
5. Отношение диаметра металлизированного отверстия к толщине платы k_n	0,5	0,5	0,33	0,33

Диаметры монтажных и переходных отверстий должны соответствовать ГОСТ 10317-79. Предпочтительные диаметры отверстий выбирают из ряда 0,7; 0,9; 1,1; 1,3; 1,5 мм, предпочтительные диаметры переходных отверстий - 0,7; 0,9; 1,1 мм.

Номинальное значение диаметра монтажного отверстия

$$d_m = d_э + r + 2h_r + \delta_{н.о.}$$

где $d_э$ — максимальный диаметр вывода радиоэлемента; r — разность между минимальным диаметром отверстия и максимальным диаметром вывода радиоэлемента ($r = 0,1 \dots 0,4$ мм); h_r — толщина гальванически наращенной меди ($h_r = 0,05 \dots 0,06$ мм); $\delta_{н.о.}$ — нижнее предельное отклонение номинального значения диаметра отверстия. Минимальный диаметр переходного отверстия

$$d_n = k_n h_{нл}$$

где k_n — отношение диаметра отверстия к толщине платы; $h_{нл}$ — толщина печатной платы.

Минимальный диаметр контактной площадки с металлизированными отверстиями

$$d_{к.н} = 2(b_n + 0,5d_m + \delta_0 + \delta_{кн}) + \delta_{ф\phi} + 1,5h_{\phi},$$

где b_n — ширина пояса контактной площадки; δ_o , $\delta_{кп}$ — погрешность расположения отверстия и контактной площадки; $\delta_{фф}$ — погрешность фотокопии и фотошаблона; $h_{ф}$ — толщина фольги.

Минимальная ширина проводника с учетом погрешностей выполнения фотокопии, фотошаблона и подтравления:

$$b_{np} = b_n + \delta_{ф.ф} + 1.5\phi$$

где b_n — номинальная ширина проводника для выбранного класса точности платы.

Минимальное расстояние между проводником и монтажным отверстием с контактной площадкой

$$t_{н.к} = t_{о.л.} - (0,5d_{к.п} + \delta_{ф.ш} + 0,5b_{np} + \delta_{с.п.})$$

где $t_{о.л.}$ — расстояние между центрами отверстий и осевыми линиями проводников; $\delta_{ф.ш}$ — погрешность расположения контактной площадки относительно координатной сетки на фотошаблоне; $\delta_{с.п.}$ — погрешность смещения проводника.

Минимальное расстояние между двумя проводниками

$$t = t_{о.л.} - (b_{np} + 2\delta_{с.п.})$$

При расчете значений $t_{н.к}$ и t параметр $t_{о.л.}$ берут из чертежа печатной платы.

Допустимые погрешности геометрических размеров элементов печатной платы и их расположения приведены в табл. 9.5.

Таблица 9.5

Погрешность	Максимальное значение,
диаметра отверстия $\delta_{н.о.}$	0,12
расположения отверстия относительно координатной сетки δ_o	0,07
расположения контактной площадки $\delta_{к.п.}$	0,15
фотокопии и фотошаблона $\delta_{ф.ф}$	0,06
расположения контактной площадки относительно координатной сетки на фотошаблоне $\delta_{ф.ш.}$	0,05
смещения проводника $\delta_{с.п.}$	0,05

Найденные значения $\delta_{пк}$ и t должны соответствовать данным табл. 9.4 и могут быть скорректированы по результатам расчета элементов платы по постоянному току.

9.2.2. Расчет по постоянному току

Согласно закону Ома падение напряжения на печатном проводнике

$$U_n = \rho I l / (h_{\phi} b_n)$$

где ρ - удельное сопротивление проводника, Ом · мм²/м; h_{ϕ} - толщина фольги, мм; b_n — ширина проводника, мм; l - длина проводника, м; I — ток, протекающий в проводнике, А.

Для медной катаной фольги $\rho = 0,017$ Ом · мм²/м; для проводников, полученных электрохимическим наращиванием, $\rho = 0,05$ Ом · мм²/м

Допустимое падение напряжения на сигнальных проводниках цифровых РЭС не должно превышать уровня статической помехоустойчивости U интегральных микросхем, на проводниках (шинах) питания и, земли — не более 1...2% от номинального напряжения питания U_n .

Таким образом, требуемая площадь поперечного сечения сигнального проводника

$$S_c \geq \rho I l / U_{n,y} \quad (9.4)$$

площадь поперечного сечения шины питания и земли

$$S_{nz} \geq \rho I l / (0,01... 0,02) U_n \quad (9.5)$$

Расчеты по формуле (9.4) показывают, что в большинстве практических случаев требуемая ширина сигнального проводника оказывается меньше предельной технологической ширины. Так, например, при толщине фольги 35 мкм, статической помехоустойчивости микросхем 0,4...0,5 В, токе в проводнике 0,1 А и длине проводника 0,6 м требуемая ширина проводника составляет 0,075 мм. Это значение в два раза меньше ширины проводника печатных плат даже четвертого класса точности. Поэтому на практике основное внимание уделяется шинам питания и земли, поскольку при большом числе микросхем на плате токи, протекающие по шинам, могут быть значительными. При выполнении расчета микросхемы и активные радиоэлементы моделируют источниками тока. Расчет по формуле (9.5) производится для максимального значения потребляемого от источника электропитания тока (принцип наихудшего случая).

После определения требуемой площади поперечного сечения шин питания и земли рассчитывается количество контактов соединителя, необходимых для подключения к плате источника питания и земли.

При косвенном сочленении число контактов соединителя

$$n_k = S_{nz} / (\pi d_v h_{\phi}),$$

где d_v — диаметр вывода соединителя.

В случае прямого сочленения количество контактов соединителя

$$n_n = S_{н.з.}/S_{к.п.}$$

где $S_{к.п.}$ — площадь контактирования контактной пары соединителя.

Расчетные значения требуемой площади поперечного сечения проводников печатной платы позволяют оценить плотности протекающих токов. Согласно требованиям к электрическим параметрам печатных плат (ГОСТ 23751-79) плотность электрического тока не должна превышать $20 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ для односторонних, двухсторонних и наружных слоев многослойных печатных плат и $1,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ — для внутренних слоев многослойных печатных плат.

9.3. Конструирование несущих конструкций блоков РЭС

Внешнее оформление РЭС определяется несущими конструкциями высших структурных уровней: блоков, моноблоков, стоек, пультов и т.д. Под несущей конструкцией понимается элемент или совокупность элементов конструкции, предназначенных для размещения составных частей РЭС и обеспечения их устойчивости к воздействиям в заданных условиях эксплуатации: влаги, вибрации, ударов, тепла, радиации, электромагнитных полей и т.д. Несущая конструкция обеспечивает необходимое положение радиоэлементов и узлов в пространстве, связи между ними, защиту от дестабилизирующих факторов условий эксплуатации, условия техники безопасности.

Кроме печатных, монтажных, коммутационных плат к несущим конструкциям относят рамки, каркасы, шасси и кожуха блоков, стеллажи, стойки, шкафы и ряд других деталей аналогичного назначения. В процессе разработки конструкторской документации на корпуса РЭС конструктора интересует выполнение не только перечисленных выше качеств, но и сроки, трудоемкость выполнения предполагаемого объема работ. В связи с этим в практике конструирования таких видов радиоустройств широко применяются различные виды конструктивной преемственности: типизация, агрегатирование, нормализация, унификация, стандартизация. Различные формы конструктивной преемственности позволяют значительно увеличить число однотипных применяемых деталей, узлов, сборочных единиц, что резко сокращает затраты на их изготовление и разработку конструкторской документации. Уровень стандартизации и унификации разрабатываемой РЭС характеризуется рядом коэффициентов-стандартизации, унификации, повторяемости.

Например, коэффициент стандартизации рассчитывается по формуле

$$K_{CT} = \frac{N_{CT} + M_{CT}}{N_0 + M_0}$$

где N_{CT} , M_{CT} — общее количество и количество стандартных сборочных единиц в изделии; N_0 , M_0 — общее количество и количество стандартных изделий, не вошедших в сборочные единицы.

Коэффициент повторяемости имеет вид

$$K_{П} = (1 - N_p) / N_0,$$

где N_p — количество наименований типоразмеров сборочных единиц изделия и его деталей.

Несущие конструкции, габариты которых стандартизованы (унифицированы), в радиоаппаратостроении носят название базовых несущих конструкций (БНК) [37]. С помощью БНК решаются проблемы, связанные с оптимальным (рациональным) выбором типоразмеров корпуса рассматриваемого класса устройств или комплекта устройств. При этом выбранная базовая конструкция может претерпевать некоторые изменения или доработки для выполнения особых функций. Преимущества применения БНК заключаются в том, что при разработке новых устройств используется уже проверенная конструкция, обеспечивается более высокая преемственность в производстве устройств, ускоряется подготовка производства, сокращается объем конструкторской документации за счет использования элементов конструкции, находящихся в процессе производства.

Существует ряд систем БНК для различных видов РЭС, ЕС ЭВМ, контрольно-измерительной аппаратуры, самолетной, судовой и т.д. [10]. Обычно при создании унифицированных систем БНК для различных классов РЭС стремятся обеспечить широкую вариантность компоновки, что позволяет на основе ограниченного количества базовых элементов получить неограниченное количество компоновочных решений. Это особенно важно для стремительно развивающихся конструкций микроэлектроники. Примером могут служить принципы разработки корпусов интегральных схем, регламентирующие пять классов (или основных типов) согласно ГОСТ 17467-79. Из них 1-, 2-, 4- и 5-й классы имеют вид прямоугольных параллелепипедов, а 3-й класс имеет форму цилиндра. Корпуса типа 1 имеют штырьевые цилиндрические выводы, расположенные на дне корпуса. Корпуса типа 2 имеют выводы, расположенные в боковых сторонах горизонтально, а после формовки при-

нимающие вертикальное положение. Корпуса типа 4 имеют планарные выводы, которые могут располагаться по всем четырем сторонам корпуса. Корпуса типа 5 в качестве выводов используют луженые площадки. Конструкции каждого типа отличаются друг от друга количеством выводов, материалом и размерами.

В качестве другого примера БНК можно привести систему корпусов для контрольно-испытательной аппаратуры. Она установлена ГОСТ 20504-74 и регламентирует систему унифицированных конструкций (УТК), предназначенных для применения в технических средствах агрегатированных комплексов приборов. Все УТК делятся на изделия нулевого, первого, второго, третьего порядков. Входимость изделий с оптимальным использованием объема обеспечивается при применении изделий высших и низших порядков. Размеры корпусов устанавливаются, исходя из модуля размером 200 мм и выбираются из следующих рядов:

по высоте H — 80, 120, 160, 200, 240, 280, 320 мм;

по ширине B — 20, 40, 60, 100, 120, 140, 160, 200, 220, 240, 280, 320, 360, 420, 480, 540 мм.

В качестве основного размера по ширине изделия второго порядка принят размер 480 мм, что соответствует международным стандартам.

В качестве примера БНК самолетной аппаратуры можно рассмотреть блоки, предназначенные для установки на стеллажах (рис. 9.3, *e*), на амортизационных рамах (рис. 9.3, *z*, *d*). В соответствии с ГОСТ 17045-71 «Корпуса блоков самолетной радиоэлектронной аппаратуры» различают блоки по длине: малые (М), короткие (К), средние (С), длинные (Д). Это соответствует ряду размеров (рис. 9.3, *b*)

$$L = 250, 319, 420, 497 \text{ мм.}$$

По высоте блоки согласно ГОСТ 17045-71 различают двух разновидностей: высокие (В) высотой 194 мм и низкие (Н) высотой 88 мм (рис. 9.3, *e*). Ширина блока B изменяется дискретно в интервале значений от 57 мм до 390,5 мм согласно рис. 9.3, *a*.

Отдельное значение ширины блока можно вычислить по формуле

$$B_n = B_0 n + (n-1) \Delta,$$

где B_0 — ширина исходного блока. Обычно это минимальный размер, т.е. $B_0 = 57$ мм; n — типоразмер корпуса по ширине, выбирается исходя из ряда чисел $n = 1; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0$; Δ — зазор между блоками: $\Delta = 10$ мм.

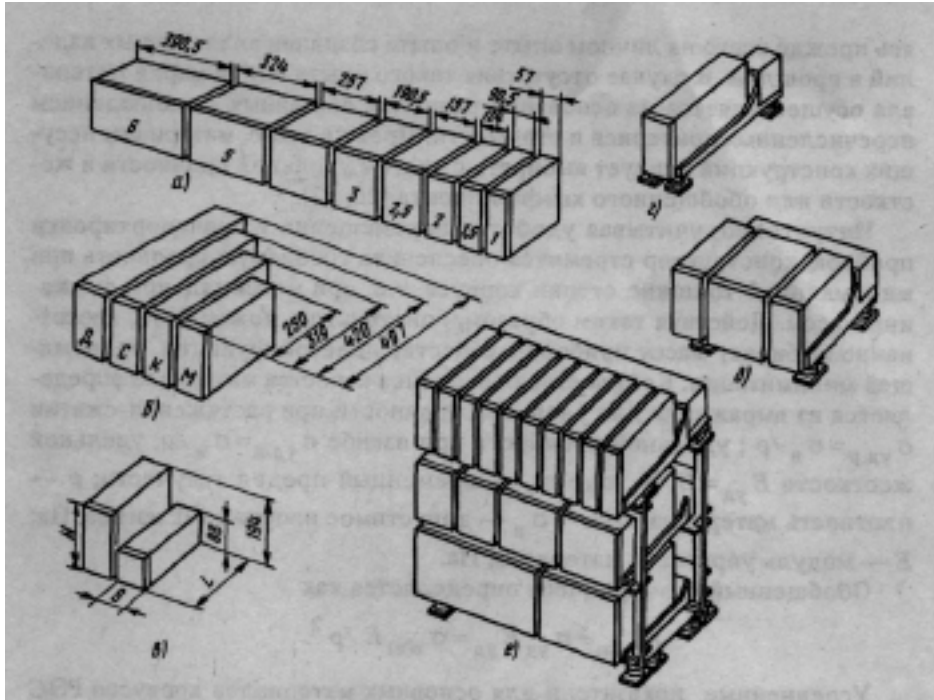


Рис. 9.3. Стандартизация корпусов самолетных РЭС:
a — по ширине; *б* — по длине; *в* — по высоте;
г, д — установка блоков на амортизационной раме; *е* — установка на стеллаже

Такие правила позволяют унифицировать оснастку для изготовления корпусов и облегчают поиск необходимых размеров для компактного размещения самолетной радиосистемы в отведенном отсеке.

9.4. Выбор материалов корпусов

В настоящее время существует целый спектр материалов для корпусов РЭС, полученных либо путем незначительных улучшений известных материалов машиностроения и авиации, либо путем их радикальных изменений или создания принципиально новых. Такое разнообразие является следствием необходимости защитить радиоэлектронное устройство от неблагоприятных воздействий окружающей среды, сохраняя удобство механической обработки, формообразования, соединения частей прибора.

Опытный конструктор, которому приходится разрабатывать самые разнообразные корпуса РЭС, производит выбор материалов, основывая-

ясь прежде всего на личном опыте и опыте создания аналогичных изделий в прошлом. В случае отсутствия такого опыта выбор марки материала осуществляется на основании расчетов, связанных с соблюдением перечисленных критериев и стоимости. Прежде всего, материалы несущих конструкций следует выбирать с учетом удельной прочности и жесткости или обобщенного коэффициента [26, 52].

Интуитивно, учитывая удобство перемещения и транспортировки прибора, конструктор стремится обеспечить требуемую прочность при минимальной толщине стенки корпуса, т.е. при максимальном снижении массы. Действуя таким образом, конструктор, может быть, неосознанно выбирает массу прибора в качестве целевой функции, подлежащей минимизации. Количественная оценка качества материала определяется из выражения для удельной прочности при растяжении-сжатии $\sigma_{уд.р} = \sigma_{\sigma} / \rho$; удельной прочности при изгибе $\sigma_{уд.и} = \sigma_{и} / \rho$; удельной жесткости $E_{уд} = E / \rho$, где σ_{σ} — временный предел текучести; ρ — плотность материала, г/см³; $\sigma_{и}$ — допустимое напряжение изгиба, Па; E — модуль упругости материала, Па.

Обобщенный коэффициент определяется как

$$K_{общ} = \sigma_{уд} E_{уд} = \sigma_{\sigma(и)} E' \rho^2$$

Усредненные показатели для основных материалов корпусов РЭС представлены в табл. 9.6.

Таблица 9.6

Материал	σ_{σ} , МПа	$E \cdot 10^{-3}$, МПа	ρ , г/см ³	$\sigma_{уд}$, Па	$E_{уд}$, м ² /с ²	$K_{общ}$
Конструкционные качественные стали	320...730	320...324	7,8...7,85	40...93	40,76...41,53	1660...3863
Сталь легированная	750...1500			96...191	3907...7932	
Сплавы титана	600...1200	110...120	4,45...4,54	132...269	24...26,43	3194...7932
Сплавы меди	200...750	100...200	8,7...8,9	22,5...86,2	11,2...23,0	252...1981
Сплавы алюминия	190...66	70...75	2,6...2,8	67,8...263	24,2...28,8	1641...7298
Сплавы магния	100...280	40...45	1,75...1,90	52,6...160	21...25,7	1107...4114

Если деталь корпуса работает на прочность (планки, стойки, кронштейны), то необходимо пользоваться значением σ_{σ} . Если де-

таль работает на жесткость (лицевая панель, шасси, крышки), то пользуются $E_{уя}$. Как видно из табл. 9.8, $E_{уд \max}/E_{уд \min} \approx 4$, а

$\sigma_{уд \max}/\sigma_{уд \min} = 11.2$ т.е. жесткость материалов примерно одинакова. Поэтому целесообразно при выборе материала пользоваться обобщенным коэффициентом $K_{об}$, который характеризует способность материала обеспечить высокую прочность при наименьшей деформации и массе.

Для корпусов РЭС из всего многообразия сталей [53] в основном применяются те, которые обладают высокой пластичностью, пригодны к изготовлению деталей штамповкой, холодной высадкой и хорошо свариваются. В основном это качественные углеродистые стали марок 08 кп, 10 кп, также 15, 20, где цифры характеризуют содержание углерода в сотых долях процента. Большее содержание углерода снижает пластичность и не позволяет штамповать деталь. Если аппаратура используется в агрессивных средах (морском тумане, кислотной, щелочной среде или при повышенной влажности), то необходимо корпуса изготавливать из легированных нержавеющей сталей. С учетом требования хорошей свариваемости и штамповки в холодном состоянии рекомендуется использовать хромо-никелево-титановые стали марки 12Х18Н9Т или их беститановые заменители: 20Х13НГ9, 10Х14АГ15, 10Х14Г14НЗ.

Чаще всего корпуса радиоаппаратуры предпочитают изготавливать из алюминиевых сплавов. Малый удельный вес, высокая пластичность и более высокая коррозионная стойкость по сравнению со сталями сделали их более предпочтительными. За счет легирующих добавок и термической обработки алюминиевые сплавы могут обладать повышенными прочностью и коррозионной стойкостью. В зависимости от способа изготовления деталей одинаково широко используются для корпусов РЭС алюминиевые сплавы, деформируемые и литейные. Из деформируемых сплавов детали несущих элементов изготавливаются резанием, механической обработкой, методами пластической деформации.

Различают деформируемые сплавы, упрочняемые и неупрочняемые; неупрочняемые — сплавы алюминия с магнием (АМг), марганцем (АМц). Они имеют высокую пластичность, хорошую свариваемость, высокую коррозионную стойкость. Эти сплавы наиболее удобны для получения деталей сваркой. Для корпусов РЭС, испытывающих повышенные механические нагрузки (инерционные воздействия, вибрации, удары), используются дуралюмины, сплавы системы «алюминий - медь - магний» (А1 — Си -Мг). Они упрочняются при термической обработке и позволяют обеспечить хорошее сочетание прочности, пластичности, коррозионной стойкости. Для РЭС используются Д1, Д16, Д19. При по-

вишенных требованиях к пластичности и коррозионной стойкости целесообразно элементы несущих конструкций изготавливать из АД31, АД33, АВ. Особенно удобны эти материалы для декоративной отделки прибора, лицевых панелей, ручек.

Для корпусов, работающих в условиях криогенных температур, предпочтительно использование ковочных сплавов АК6, АК8 системы $Al-Mg-Si$. Как следует из табл. 9.6, снижение пластичности — наиболее эффективный путь повышения удельной прочности α и удельной жесткости. Значительного улучшения таких характеристик можно достичь, если использовать сплав 1420 системы $Al-Mg-Li$, который отличается от сплава Д16 пониженной на 11% плотностью и повышенным на 4% модулем упругости. Коррозионная стойкость такая же, как и у АМг. Применение сплава 1420 вместо Д16 позволяет снизить массу деталей корпуса на 10...15%.

Для изготовления несущих элементов сложной формы используются литейные сплавы. По назначению эти сплавы можно условно разбить на следующие группы:

1. Сплавы, предназначенные для герметичной РЭС (АЛ2, АЛ4, АЛ9, В АЛ 8, АЛ9-1, АЛ34(ВАЛ5), АЛ4М, АЛ32.

2. Высокоч прочные жаропрочные сплавы (АЛ19, АЛ3, АЛ5, АЛ5-1, АЛ33(ВАЛП).

3. Коррозионно-стойкие сплавы (АЛ8, АЛ22, АЛ21, АЛ27, АЛ27-1).

Корпуса РЭС и их детали относятся к элементам малых размеров. Качество таких деталей, полученных литьем, будет определяться не столько механической прочностью, сколько технологическими характеристиками: жидкотекучестью, степенью изменения механических свойств, герметичностью, склонностью к образованию пустот, трещин. Поэтому наибольшее распространение получили сплавы первой группы, выполненные на основе $Al-Si$, $Al-Si-Mg$, так называемые силлумины. Двойной сплав АЛ2 ($Al-Si$) рекомендуется для литья малогабаритных деталей, так как он не упрочняется термически и склонен к образованию усадочных раковин. Остальные сплавы этой группы относятся к системе $Al-Si-Mg$ и имеют лучшие литейные свойства. Поэтому крупногабаритные детали РЭС целесообразно отливать из АЛ4, АЛ9. Если необходима повышенная механическая прочность удобно использовать АЛ9-1, содержащий добавку титана. Сплавы АЛ32, ВАЛ8 предназначены для литья под давлением и точного литья.

Коррозионно-стойкие сплавы третьей группы обладают повышенной стойкостью в морской воде, щелочных и азотнокислых средах. Однако невысокий интервал рабочих температур коррозионных свойств (от -60 до $+60^{\circ}C$) ограничивает их применение для РЭС. Лишь АЛ24

может сохранить свои свойства до +150°C. Основные характеристики марок алюминиевых сплавов приведены в табл. 9.7.

Таблица 9.7

Сплав	ρ , г/см ³	E, МПа	σ_B , МПа	E уд	$\sigma_{уд}$	K _{общ}
АМц	2,73	70	170	25,6	62,27	159,41
АМг2	2,68	71	190	26,49	70,89	1878,0
Д16	2,8	72	360	25,71	128,5	3305,5
Д16Т	2,8	72	460	25,71	164,28	4223,78
Д19	2,76	70	480	25,36	173,9	4399,99
АД31	2,71	71	250	26,2	92,25	2416,9
АД33	2,71	71	140	26,2	51,66	1353,5
АВ	2,70	71	350	26,3	129,6	3409,2
АК6	2,75	72	378	26,18	137,4	4525,7
АК8	2,80	74	480	26,40	171,4	4525,7
1420	2,47	75	450	30,36	182,2	5531,1
АЛ2	2,65	70	190	26,4	71,70	1892,8
АЛ4	2,65	70	290	26,40	199,4	2889,0
АЛ9	2,66	70	230	26,30	86,4	22274,8
ВАЛ8	2,73	72	410	26,30	150,18	3942,2
АЛ 32	2,65	71	280	26,79	105,60	2831,7
АЛ27	2,55	70	360	27,45	141,1	3879,2
АЛ 24	2,74	69	310	25,18	113,1	2848,8

Ценными материалами для радиотехнических конструкций является магниевые сплавы. Они хорошо поглощают вибрации, что особенно важно для самолетной и вертолетной аппаратуры. Например, удельная вибрационная прочность магниевых сплавов почти в 100 раз выше, чем у дуралюминов (Д16) и в 20 раз лучше, чем у конструкционных сталей. По удельной жесткости при изгибе и кручении магниевые сплавы не уступают алюминиевым и стальным. Эти сплавы используются не только как ценный технический материал с малой плотностью, но и как заменитель дефицитных и дорогостоящих легированных сталей, бронз, латуней. Так, для микроэлектронной аппаратуры интерес представляют сверхлегкие сплавы МА18, МА21 с плотностью 1,3-1,6 г/см³, которые обладают повышенными пластичностью, удельной жесткостью и прочностью выше, чем у дуралей (табл. 9.8).

Следует отметить сплав МЦИ, предназначенный для литья деталей, работающих в условиях вибраций. Его использование позволяет уменьшить массу деталей, подвергающихся повышенной вибрационной нагрузке, и увеличить надежность и срок службы. Литейные магниевые сплавы предназначены для фасонного литья. В конструкциях РЭС применяются сплавы МЛ4, МЛ6, МЛ9, МЛ10.

Сплавы титана находят ограниченное применение при разработке несущих элементов РЭС. Удельные прочностные характеристики — такие же, как у *Mg* и *Al*. Модуль упругости в два раза меньше, чем у ста-

Таблица 9.8

Сплав	$\sigma_{в}$, МПа	$E \cdot 10^{-3}$, МПа	ρ , г/см ³	$\sigma_{уд}$	$E_{уд}$	$K_{общ}$
МА18	185	45	1,5	123	30	3690
МА21	240	46	1,5	160	30,6	4896
МЦИ	170	40	1,9	94	21	1978,9
МА8	280	42	,78	123	23,5	2890,5
МА2-1	270	43	,78	151,6	24,1	3653,6
МА2	260	43	,79	145,2	24	3484,8
МЛ4	250	42	,83	136,6	22,9	3135,0
МЛ6	250	42	,81	138,1	23,2	3204,5
МЛ9	250	42	1,76	142,0	23,8	3388,6
МЛ10	226	41	1,78	126,9	23,0	2922,9

лей, что затрудняет получение жестких конструкций. Несмотря на высокую температуру плавления, титан не обладает жаропрочностью и склонен к ползучести даже при нормальных температурах. Наиболее ценными качествами титана являются высокие прочностные свойства при криогенных температурах и низкий коэффициент линейного расширения. Поэтому титановые сплавы находят применение прежде всего для устройств, работающих в условиях пониженных температур (вплоть до криогенных), и для корпусов микросборок, где требуется спай стекла с металлом. Для этих целей рекомендуется использовать сплавы: ВТ 1-00, ВТ-0, ОТ-4-1, ОТ4, ВТ5, ВТ5-1.

9.5. Корпуса РЭС из волокнистых композиционных материалов

В конструкциях самолетной и бортовой аппаратуры широкое применение находят полимерные композиционные материалы (КМ) с неметаллической матрицей. По сравнению со сплавами металлов они имеют ряд преимуществ: меньшую массу, повышенные прочность, жесткость и теплостойкость. Из большого числа существующих КМ наиболее перспективными для авиационной аппаратуры являются КМ на основе углеродных волокон, т.е. углепластики. Кроме перечисленных достоинств, они обладают еще рядом преимуществ: коррозионной стойкостью, электропроводностью, малым коэффициентом линейного расширения, высокой демпфирующей способностью и значительно превосходят металлы по вибропрочности. В табл. 9.9 приведены основные характеристики наиболее распространенных углепластиков: КМУ-1Л на основе углеродной ленты; КМУ-1У на основе углеродного жгута; КМУ-1В на основе углеродного жгута, вискоризированного нитевидными кристаллами. Их теплостойкость — до 100°C. Для более высоких температур (до 300°C) применяются углепластики марок КМУ-2, КМУ-2Л.

Еще более высокой теплостойкостью (до 2000°С) обладает углепластик с углеродной матрицей марки КУП-ВМ.

Таблица 9.9

Параметр	Углепластики				Бороволокниты			
	КМУ-1Л	КМУ-1У	КМУ-1В	КУП-ВМ	КМБ-1М	КМБ-1К	КМБ-2К	КМБ-3К
ρ , г/см ³	1,4	1,47	1,55	1,35	2,1	2,0	2,0	2,0
σ_b , ГПа	0,65	1,02	1,0	0,2	1,3	0,9	1,0	1,3
σ_c , ГПа	0,35	0,4	0,54	0,26	1,16	0,92	1,25	1,5
$\sigma_{и}$, ГПа	0,80	1,10	1,20	0,64	1,75	1,25	1,55	1,45
E, ГПа	120	180	180	165	270	214	260	260
$E_{и}$, ГПа	103	145	160	160	250	223	215	238
$\sigma_{уд}$	46,4	693	645	148	619	450	500	650
$E_{уд}$	85,7	122,3	116,1	122,2	128,5	107	130	130
$K_{общ}$	3978	84857	74900	18088	79585	48150	65000	84500

Элементы конструкций из углепластиков изготавливаются несколькими методами, например мокрой намоткой, когда жгуты или ленты пропитываются связующим составом в процессе укладки. Другой метод связан с пропиткой связующим составом под давлением, когда заготовку из сухого наполнителя пропитывают в замкнутой форме и затем формируют деталь при повышенном давлении и температуре. Метод выбирается в зависимости от геометрических особенностей детали. Наиболее технологичным является углепластик КМУ-3, для которого температура и давление формообразования минимальны.

Еще более высокими механическими свойствами обладают бороволокниты на основе борного волокна. От углепластиков они выгодно отличаются сочетанием таких свойств, как высокое сопротивление сжатию, срезу, сдвигу, низкая ползучесть, высокая твердость и модуль упругости. Бороволокниты КМБ-1 и КМБ-1К предназначены для длительной работы при температуре до 200°С. Бороволокнит КМБ-2К сохраняет высокие механические свойства до 300°С. Материалы КМБ-3 и КМБ-3К содержат эпоксидный связующий состав и отличаются наиболее высокими механическими свойствами, технологичностью, низким давлением при формообразовании, но их рабочая температура не превышает 100°С.

10. ЗАЩИТА РЭС ОТ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ

10.1. Общие сведения о внешних воздействующих факторах

Условия эксплуатации изделий. Во время эксплуатации на РЭС влияет значительное количество внешних воздействующих факторов, среди которых можно выделить [54] следующие основные группы: механические, климатические, биологические, термические факторы.

К механическим факторам относятся вибрационные, ударные и линейные нагрузки.

К климатическим факторам (в соответствии с ГОСТ 15150-69) относятся температура окружающего воздуха, его влажность, давление воздуха или газа, солнечная радиация, дождь, ветер, пыль, тепловой удар, морской туман, атмосферные осадки, содержание в воздухе (воде) коррозионно-активных агентов.

К биологическим факторам относятся бактерии и плесневые грибки.

К термическим факторам относятся аэродинамический нагрев, радиационное, электрическое и ультразвуковое разогревания.

Кроме перечисленных, на РЭС в процессе эксплуатации могут оказывать влияние и другие факторы, например специальная среда, электростатические, магнитостатические и электромагнитные поля, лазерное излучение.

Условия эксплуатации РЭС можно разделить на нормальные, наземные естественные, наземные транспортные и условия на высотных самолетах, ракетах, космических объектах. Под нормальными условиями работы РЭС понимают такие, при которых температура воздуха — 15...25°C, относительная влажность — 45...75%, атмосферное давление — 96...106 кПа, отсутствуют механические воздействия, воздействия пыли и песка, атмосферных осадков, солнечной и ядерной радиации, биологических факторов и др.

Воздействия влаги на РЭС. Характер воздействия влаги на РЭС определяется свойствами воды в жидком, твердом и газообразном состояниях.

Возможны два основных вида взаимодействия воды с материалами. В первом случае вода проникает в трещины, зазоры, капилляры или находится на поверхности вещества, удерживаясь на его мелкодисперсных частицах. Во втором случае вода оказывается химически связанной с элементами вещества [55].

Этот вид взаимодействия воды с материалами приводит к ускорению процессов коррозии металлов, гидролизу и способствует распаду

некоторых материалов. Коррозия металлов приводит к снижению механической прочности конструкций, уменьшению точности и продолжительности работы механизмов, нарушению контактных соединений, обрывам тонких проводов и т.п.

Воздействие пониженного атмосферного давления на РЭС. Снижение атмосферного давления приводит к изменению напряжения электрического пробоя воздуха. Уменьшение атмосферного давления оказывает влияние на параметры ЭРЭ и РЭС непосредственно и косвенно. Непосредственное влияние вызывает изменение емкости и допустимого рабочего напряжения конденсаторов с воздушным диэлектриком, уменьшение величины допустимого рабочего напряжения изоляторов, волноводов, элементов антенно-фидерных трактов и между проводниками электрического монтажа. Увеличивается вероятность возникновения искровых разрядов в негерметизированных высоковольтных выпрямителях и антенно-фидерных трактах. Повышается механическая нагрузка на кожухи герметизированных элементов РЭС. Косвенное влияние проявляется в ухудшении условий воздушного охлаждения РЭС вследствие уменьшения плотности и теплоемкости воздуха.

Влияние пыли и песка на РЭС. Пыль представляет собой мельчайшие частицы различного происхождения и разных физико-химических свойств. Различают пыль неорганического и органического происхождения.

Неорганическая пыль составляет 65...75% всех аэрозолей и представляет собой частицы в виде пластинок, иголок, чешуек с размерами до 0,2 мм. В состав неорганической пыли входят кварц, полевой шпат, слюда и др.

Органическая пыль представляет собой споры растений, плесневые грибки, бактерии, частицы волокна из шерсти и хлопка, мельчайшие остатки насекомых и растений. При повышенной влажности органическая пыль может служить хорошей питательной средой для плесени [56].

Пыль, оседая на поверхности различных деталей и ЭРЭ РЭС, создает хорошие условия для их увлажнения. Содержащиеся в пыли растворимые соли также хорошо поглощают влагу. При этом на поверхности металлов может происходить коррозия. Пыль на поверхности изоляционных материалов способствует адсорбированию влаги этими материалами. Увлажненная пыль на поверхности лакокрасочных покрытий вызывает химические реакции, результатом которых является разрушение покрытий. Проникая в микротрещины изоляционных материалов, пыль снижает их изоляционные показатели. В механизмах пыль увеличивает трение и износ материалов, окисление смазочных материалов. Попадая в коммутационные элементы, пыль ускоряет износ контактов, может

вызывать образование коронного разряда между контактами и, следовательно, их нагрев.

Биоповреждения РЭС. При эксплуатации РЭС в различных климатических районах в условиях повышенной влажности, ограниченного доступа воздуха и умеренной температуры (0...30°С) часто наблюдаются повреждения, вызванные микробиологическими организмами. Эти повреждения выражаются в снижении прочностных, электроизоляционных и других свойств конструкционных материалов и покрытий. Продукты жизнедеятельности микроорганизмов (метаболиты) стимулируют процессы коррозии металлов. К агентам биологического поражения РЭС относятся грызуны, насекомые, плесневые грибки, бактерии. Однако наибольшую опасность для РЭС представляют плесневые грибки, которые поражают самые разнообразные материалы: пластмассы, кра-ски, лаки, резину, дерево и даже металлы. Если грызуны и насекомые наносят механические разрушения, то грибки вызывают повреждения продуктами метаболизма по электрохимическому и химическому механизмам. Действие плесени на пластмассы зависит от их состава. Наиболее подвержены действию плесени органические наполнители и пластификаторы. Слабо противостоят действию плесени феноло-формальдегидные смолы, нитроцеллюлоза, поливинилацетат; очень слабо — древесина и масляные краски. Плесень способна поражать также стекло, если на нем имеется питательная среда. Хорошей питательной средой для плесени является канифоль, которая может оставаться на местах пайки. При появлении плесени снижается сопротивление изоляции, ускоряется процесс коррозии металлов, разрушаются защитные покрытия, нарушаются контакты, возможны замыкания, пробой и т.п.

Влияние радиоактивных излучений на РЭС. По происхождению радиоактивные излучения (РИ) могут быть разделены на естественные и искусственные. К естественным излучениям относятся космическое, корпускулярное и рентгеновское излучения Солнца и радиационных поясов Земли. Искусственное РИ возникает в результате ядерных реакций в реакторах или при взрыве.

Радиоактивностью называется самопроизвольное превращение неустойчивых изотопов одного химического элемента в изотопы другого элемента, сопровождающееся испусканием некоторых частиц. Существует пять видов радиоактивности: α -распад, β -распад, спонтанное деление, протонная и двухпротонная радиоактивности. Все они характеризуются достаточно продолжительными превращениями ядер, которые определяются либо характером взаимодействия (слабые взаимодействия при β -распаде), либо задержкой испускания положительно заряженных частиц кулоновским потенциальным барьером в ядре (α -распад, спонтанное деление, протонные радиоактивности). Обычно все

виды радиоактивности сопровождаются испусканием γ -лучей (потоков жестких фотонов с длиной волны $10^{-9} \dots 10^{-11}$ см).

В свою очередь виды излучений подразделяют на мгновенное (γ -лучи), инициированное (нейтроны и γ -кванты), стационарное (α и β -частицы) и остаточное (продукты вторичного расщепления).

Уровни воздействия радиоактивных (фоновых) излучений определены их дозой поглощения и скоростью потока эквивалентных нейтронов на один квадратный сантиметр. Доза поглощения есть энергия любого вида излучения, поглощаемая единицей массы облучаемого вещества и измеряемая в радах ($1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Дж/кг} = 100 \text{ эрг/г}$). Различают также дозу интегральную (общее количество энергии поглощения всей массой материала, г рад) и дозу биологическую (количество энергии, поглощенное тканью, биологически эквивалентное одному рентгену рентгеновских или γ -лучей), выражаемую в бэрах. При облучении биологической ткани дозой γ -лучей в 1 рад в 1 г ткани поглощается 93 эрг энергии излучения. При естественном фоне (космические лучи, радиоактивность окружающей среды и тела человека) мощность излучения не превышает 0,1 бэр/год. При местном медицинском излучении доза не превышает 10 бэр, а лучевая болезнь наступает при дозе в 400...500 бэр.

Радиационная стойкость материалов и ЭРЭ характеризуется следующими уровнями доз облучения: металлы и сплавы — $10^{10} \dots 10^{12}$ рад, керамика, кварц, стекло, ситалл — $10^7 \dots 10^8$ рад, пластмассы и эластомеры — $10^5 \dots 10^6$ рад, полупроводниковые приборы и ИС — 10^4 рад.

Рассмотрим воздействие излучений на некоторые материалы. Фоновые излучения, воздействующие на металлы и сплавы, увеличивают их прочность и уменьшают вязкость; электрические же характеристики при этом практически не меняются.

У керамических материалов и изделий из них увеличивается склонность к пробою, а кварц и стекло начинают тускнеть, терять прозрачность.

Термопластичные материалы становятся хрупкими, темнеют или обесцвечиваются. Наиболее термостойкий, химически неактивный, высокочастотный фторопласт-4 уже при дозе 10^4 рад разлагается на фтористоводородные соединения. Наиболее стойким является полистирол. Эластомеры становятся твердыми, теряют эластичность, а бутиловый каучук, наоборот, становится клейким. Пропиточные и заливочные масла образуют отстой и выделяют газ.

В большинстве случаев нарушения работоспособности РЭС при воздействии РИ сказываются в основном в изменении параметров ППП и ИС. Величину изменения параметров можно оценить на основании

справочных данных по стойкости материалов и ЭРЭ. Наряду с информацией об изменении параметров ЭРЭ при воздействии соответствующих уровней РИ в справочниках приводят информацию о коэффициентах радиационной чувствительности к воздействию γ -излучения, а также о максимальной мощности дозы γ -излучения, при которой происходит отказ ЭРЭ в схеме.

Под действием γ -импульса происходит ионизация конструкции прибора и окружающей его среды, что вызывает возникновение кратковременных межэлектродных проводимостей и первичных фототоков.

Протекание фототоков в цепях транзистора может привести к нежелательным последствиям, таким как изменение состояния ключевых схем, появление ложных сигналов в аналоговых схемах, а также перегорание транзистора из-за вторичного пробоя, если не приняты меры по его предотвращению последовательным включением индуктивности или токоограничивающих сопротивлений.

Облучение ППП нейтронами приводит к изменениям основных параметров изделий. Эти изменения обусловлены в основном дефектами в структуре полупроводникового материала, а также ионизирующей способностью нейтронов высоких энергий. У маломощных транзисторов наиболее чувствительными к воздействию потока нейтронов являются коэффициент передачи базового тока и напряжение между эмиттером и коллектором в режиме насыщения, уменьшающиеся с ростом потока нейтронов, а также обратный ток коллекторного перехода.

При воздействии импульсного γ -излучения в ИС все обратносмещенные переходы генерируют фототоки, которые могут привести к изменению состояния ИС. Характерно то, что в ИС с изоляцией p — n переходами ионизационные эффекты примерно на порядок выше, чем в схемах на дискретных элементах.

В настоящее время не существует единой точки зрения по вопросу проектирования радиационно стойких ИС. Считается, что необходимо соблюдать следующие наиболее общие правила при их разработке [58]: уменьшать отношение числа активных элементов ИС к числу пассивных; уменьшать рассеиваемую в ИС мощность, использовать радиационно стойкие проводящие и диэлектрические материалы; повышать универсальность ИС; снижать зависимость выходных параметров ИС от коэффициентов усиления входящих в ее состав транзисторов.

Изменения параметров резисторов при воздействии РИ обусловлены изменением параметров материалов конструктивных элементов резистора и окружающей резистор среды в результате ионизации, нарушения структуры и химических процессов в материалах и радиационного разогрева.

В радиационно стойкой РЭС рекомендуется применять по возможности низкоомные резисторы (менее 10 кОм), а высокоомные — подвергать опрессовке или заливке эпоксидной смолой. Увеличение толщины защитного покрытия в 10 раз позволяет снизить чувствительность резистора к воздействию РИ не менее чем в 5-8 раз. Следует также предусматривать максимальное удаление резисторов друг от друга и защиту их выводов. При уменьшении размеров резистора его устойчивость к РИ повышается.

Радиационная стойкость конденсаторов определяется стойкостью диэлектрика. Наименьшей радиационной стойкостью обладают конденсаторы с органическим диэлектриком и электролитические. Степень изменения параметров у этого класса конденсаторов не зависит от вида РИ при равнозначных коэффициентах передачи энергии, а определяется в основном дозой поглощенной энергии, поскольку механизм воздействия любого излучения на изделия с органическим диэлектриком сводится к процессам ионизации и возбуждения атомов молекул.

Конденсаторы с неорганическим диэлектриком (керамические, стеклокерамические, стеклянные) обладают высокой радиационной стойкостью. Для конденсаторов с неорганическим диэлектриком в отличие от конденсаторов на основе полимерных материалов важными являются не только поглощенные дозы, но и интегральный поток быстрых нейтронов.

При действии РИ в электролитических конденсаторах наблюдаются нарушение уплотнений и катастрофическое ухудшение электрических параметров (в первую очередь, емкости).

В жидкостных электролитических конденсаторах с объемным пористым анодом из окисей тантала и ниобия наименее радиационно стойким элементом является герметизирующая прокладка из фтороорганической резины.

Причиной ухудшения электрических параметров оксидно-полупроводниковых конденсаторов в условиях воздействия γ -радиации при больших интегральных потоках являются снижение сопротивления двуокиси марганца и, естественно, нарушение работоспособности конденсаторов.

Стойкость точных изделий к воздействию РИ определяется степенью изменения свойств применяемых в них материалов и конструкций и зависит от характеристик γ -нейтронного излучения. Под воздействием непрерывного γ -нейтронного излучения у магнитных материалов изменяются индукция, магнитная проницаемость, электрическое сопротивление, упругость и другие характеристики. Монолитность конструкций из железа и меди, обладающих сравнительно большими

коэффициентами теплообразования, приводит к значительному радиационному нагреву. При этом сопротивление изоляции трансформаторов уменьшается на несколько порядков (примерно до $10^2 \dots 10^4$ МОм). При прекращении воздействия излучения сопротивление изоляции восстанавливается полностью.

В современных РЭС важную роль играют радиочастотные и низкочастотные соединители (разъемы). Встречаются два типа радиационных повреждений разъемов. Повреждение, при котором изменяются физические характеристики изоляционных материалов, может привести к механическому ослаблению опоры штырей, о чем судят по появлению хрупкости органических диэлектриков. Постоянная или временная потеря сопротивления изоляции между контактами или по корпусу — это повреждение второго типа.

Наиболее чувствительными элементами к воздействию у-нейтронного излучения у разъемов являются опорные шайбы и контактные промежутки из различных органических диэлектриков и пластмасс, наиболее критичными параметрами при облучении — сопротивления изоляции, наименее радиационно стойкими — соединители с опорными шайбами из фторопласта-4.

При воздействии импульсного γ -излучения в материалах опорных шайб и контактных промежутках за счет ионизации возникают токи утечки, что приводит к резкому снижению сопротивления изоляции на 3-5 порядков. Такое изменение сопротивления изоляции носит обратимый характер и после прекращения импульса излучения практически полностью исчезает [57].

Радиационная стойкость кабелей и проводов определяется радиационной стойкостью применяемых в них конструкций изоляционных материалов, физико-механические свойства которых зависят от поглощенной дозы у-излучения. Затухание в радиочастотных кабелях равномерно возрастает при увеличении дозы γ -излучения. Сопротивление изоляции монтажных проводов с полиэтиленовой изоляцией при воздействии потока нейтронов снижается.

10.2. Особенности работы РЭС в условиях воздействия факторов космического пространства

К факторам космического пространства, наряду с космическими ионизирующими излучениями, относятся глубокий вакуум, лучистые тепловые потоки и невесомость.

Глубокий вакуум космического пространства характеризуется крайне низкими значениями концентрации частиц, плотности и давления атмосферы. На высоте 150—200 км давление окружающей среды со-

ставляет 10^{-4} Па, а на высотах более 10 тыс. км — менее 10^{-11} Па [59]. Однако характеристика условий открытого космического пространства еще не является характеристикой условий работы РЭС. На поверхности космического аппарата в негерметизированных блоках аппаратуры и отсеках изделия за счет испарения материалов конструкций давление будет существенно выше давления среды, окружающей изделие (порядка 10^{-7} ... 10^{-2} Па). Тепловое воздействие вакуума проявляется в снижении теплоотвода от энерговыделяющих изделий из-за полного отсутствия конвективного теплообмена и резкого падения теплопроводности газа. Поэтому учет теплового воздействия вакуума на РЭС сводится к определению зависимости допустимых рассеиваемых изделиями мощностей от давления. Глубокий вакуум оказывает сильное воздействие на трущиеся и контактирующие поверхности, приводя к эффектам сухого трения и холодной сварки. Кроме того, в процессе изменения давления от нормального атмосферного до глубокого вакуума между электродами изделий, находящихся под напряжением 100 В и более, могут наблюдаться такие явления, как электрический пробой, коронный и тлеющий разряды, которые приводят к нарушению работоспособности РЭС. Проявление указанных электрических эффектов наиболее вероятно в области давлений от 10^{-4} ~ до 10^{-1} Па.

Основным источником лучистой энергии космического пространства — *лучистых тепловых потоков* — является Солнце. В состав прямого солнечного излучения входит и электромагнитное излучение Солнца с длиной волны короче 0,3 мкм, называемое ультрафиолетовым излучением. Под действием ультрафиолетового излучения могут меняться свойства оптики и терморегулирующих покрытий, свойства красителей и органических материалов, поверхностная электропроводность и т.д. Ультрафиолетовое излучение проникает в большинстве материалов на глубину нескольких ангстрем, поэтому все повреждения ограничиваются лишь поверхностным слоем.

Невесомость как фактор космического пространства имеет место при свободном орбитальном полете КА и является средством уравновешивания силы гравитации силами инерции. Невесомость, воздействующая на РЭС, рассматривается только как фактор, оказывающий влияние на тепловой режим изделий. В этом смысле невесомость следует учитывать для РЭС, размещаемой в герметизированных отсеках КА. Тепловое воздействие невесомости так же, как и вакуума, характеризуется отсутствием конвективной составляющей теплоотдачи от энерговыделяющих изделий. Использование для охлаждения принудительной циркуляции газа в условиях орбитального полета практически устраняет эффект воздействия невесомости. Однако если при этом име-

ются «застойные» зоны, в которых скорость потока газа близка к нулю, то в них эффект невесомости проявляется сильно.

10.3. Защита от воздействий внешней среды

Для защиты поверхности деталей от воздействий внешней среды применяют различные покрытия, которые по назначению делят на три группы: защитные, защитно-декоративные и специальные.

Защитные покрытия предназначены для защиты деталей от коррозии, старения, высыхания, гниения и других процессов, вызывающих выход изделия из строя. Защитно-декоративные покрытия наряду с обеспечением защиты деталей придают им красивый внешний вид. Специальные покрытия придают поверхности деталей особые свойства или защищают их от влияния особых сред.

Выбор того или иного вида покрытия в каждом конкретном случае зависит от материала детали, ее функционального назначения и условий эксплуатации. Основные виды металлических покрытий, их назначение и область применения приведены в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Вид покрытия	Назначение и область применения покрытия	Материал деталей	Толщина покрытия, мкм
Цинковое	Защита от коррозии корпусов, крышек, панелей, шасси, каркасов, резьбовых крепежных деталей; получение светопоглощающей поверхности	Сталь, медь, медные сплавы	6...30
Кадмиевое	Защита от коррозии в морских условиях корпусов, крышек, каркасов и т.д.	---	6.. 30
Никелевое	Защита от коррозии экранов, сердечников, корпусов, крепежных деталей; придание деталям повышенной отражательной способности	---	3...18
Хромовое	Защита от коррозии с одновременной декоративной отделкой корпусов, ручек и т.п.; увеличение твердости деталей, работающих на трение	---	9...4S
Оловянно-свинцовое	Улучшение пайки контактов, лепестков проводов	---	3...15
Серебряное	Улучшение электропроводности с временной защитой от коррозии контактов, пружин, лепестков; улучшение пайки	Сталь, медь, медные сплавы, алюминий и его сплавы	6... 15
Золотое	Уменьшение переходных сопротивлений контактов, пружин, лепестков	Медь, медные сплавы	5...21

Из приведенных в табл. 10.1 металлических покрытий наибольшей температурной стабильностью обладает хромовое (тускнеет при 500°C); золотое покрытие не взаимодействует с кислотными, щелочными и сернистыми соединениями, но очень мягкое и легкое, подвергается износу и истиранию. В ряде случаев защитное покрытие делают многослойным, например: слой меди, толщиной 6...10 мкм (высокая адгезия к стали), слой никеля толщиной 3...6 мкм (высокая твердость), слой хрома толщиной 0,5 мкм (антифрикционность).

Пленочные покрытия образуют на поверхности материала тонкий и непрерывный слой лака. Они защищают материалы от проникновения в его поры влаги, увеличивают прочность изоляции. При пропитке или покрытии деталей используют изоляционные лаки УР-231, СБ-1С; перхлорвиниловые эмали ХВ-125; пентафталевые эмали ПФ-115, МФ-28, ПФ-223; эпоксидные эмали Э-5, Э-11; нитроцеллюлозные эмали НЦ-11; ЭМ-508, НЦ-25; кремнийорганические эмали ЭМ-9, ЭМК-2, ЭМКО-81 и компаунды МБК, ЭЗК, ФК-20, УТ-31. Пленочному покрытию изоляционными лаками и эмалями подвергаются многие функциональные узлы печатного монтажа, микросхемы и микросборки. Пропитке также подвергаются детали, изготавливаемые из гигроскопичных, пористых или волокнистых материалов, а также различные моточные изделия.

Применяемые лаки, эмали, компаунды, эпоксидные смолы разрабатывались, в первую очередь, для защиты от коррозии, создания лакокрасочных и декоративных покрытий, а также для пропитки, заливки, склеивания и т.д. К недостаткам органических полимерных материалов относится ухудшение электрических и механических свойств при длительном воздействии повышенных температур и их резком изменении.

В настоящее время применяются комбинированные пассивационно-защитные покрытия из тонкой пленки неорганического диэлектрика и органического полимерного покрытия. Назначение тонкой пленки диэлектрика, например слоя SiO_2 , — нейтрализовать активные центры и в определенной мере стабилизировать свойства поверхности. Относительно толстый слой полимерного покрытия предотвращает механическое повреждение пленки неорганического диэлектрика, защищает его поверхность от воздействия внешней атмосферы.

В качестве пропиточных, заливочных и обволакивающих материалов широкое распространение получили компаунды на основе эпоксидных смол ЭД-5 и ЭД-6. Компаунды ЭПК-1 и ЭПК-4 применяют для пропитки, компаунды ЭЗК-1, ЭЗК-4, ..., ЭЗК-12, ЭК-20 — для заливки деталей и узлов.

Пенополиуретан ЖК-2 применяют, когда требуется обеспечить теплоизоляцию изделий при сохранении малой массы. Его достоинством является высокая адгезия к большинству материалов.

Широкое распространение получили пластичные компаунды и герметики ВГП-2П, ВГО-1, СКГН-1, виксинты У-1-18, У-2-28, К-18, ПК-68.

Недостатком этих компаундов и герметиков на каучуковой основе является их недостаточная адгезионная способность к металлам и различным материалам.

10.4. Герметизация корпусов микросхем и РЭС

Корпусная герметизация обычно предусматривает окончательную защиту от климатических и радиационных воздействий, оговоренных в ТУ на изделии. Корпуса изготавливаются на основе не сорбирующих влагу неорганических материалов (металла, стекла, керамики). Проводная арматура (выводы, теплоотводы), а также герметизация мест соединения отдельных деталей в них должны быть вакуумно-плотными, поэтому подобные корпуса относятся к категории вакуумно-плотных. Для интегральных схем корпуса подразделяются на металлические, металлостеклянные, стеклянные, металлокерамические и керамические.

Плоские корпуса ИС выполняют в двух основных конструктивных вариантах: со штыревыми и планарными выводами, расположенными обычно по противоположным сторонам корпуса.

Герметизация обеспечивает вакуумно-плотное соединение выводов корпуса с его основанием или стенкой, изолирование выводов от металлических частей корпуса и собственно герметизацию корпуса, которая производится после сборки и монтажа изделия и состоит обычно в создании вакуумно-плотного шва.

В керамических корпусах герметизация выводов осуществляется стекломалью или стеклоприпоем. Узел «вывод — тело корпуса» (гермоввод) является критичным у всех корпусов, так как механические нагрузки на выводы при монтаже корпусов могут привести к потере герметичности узла. Некоторые конструкции герметичных выводов представлены на рис. 10.1. Видно, что оптимальной является конструкция керамического корпуса, внешние выводы которого устанавливаются вне герметизированного объема (рис. 10.1,а).

Герметизация стеклянных и керамических (рис. 10.1, б) корпусов производится металлизацией узлов корпуса по месту соприкосновения с последующей пайкой. Широкое распространение получила герметизация стеклянных корпусов бесфлюсовой пайкой низкотемпературными припоями. Существует герметизация керамических корпусов с помощью приклейки крышки корпуса к рамке органическими полимерными клеями.

Герметизация металлостеклянных корпусов обычно осуществляется сваркой плавлением, контактной сваркой, иногда пайкой мягкими

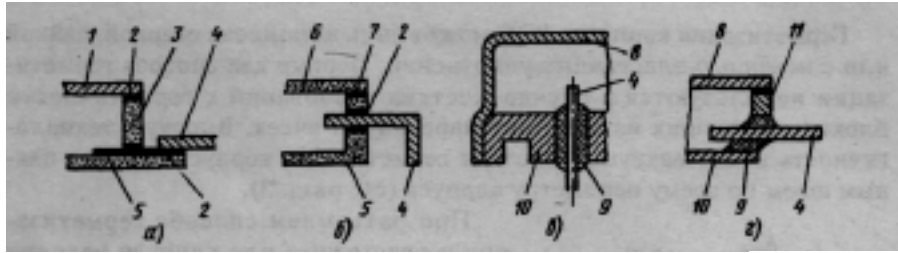


Рис. 10.1. Конструкции герметичных выводов корпусов:
а, б — керамические; *в, г* — металлоглазые;
1 — припаянная крышка (ковар); *2* — слой металла; *3* — керамическое кольцо;
4 — вывод (ковар); *5* — основание (керамика); *б* — крышка (керамика);
7 — слой металла или клеевой шов; *8* — крышка (нержавеющая сталь, ковар);
9 — изолятор (стекло); *10* — основание (ковар); // — кольцо (ковар)

припоями. Примеры конструкций стеклянных корпусов приведены на рис. 10.1, *в, г*.

Высокий уровень герметичности корпусов допускает повышение надежности изделий за счет заполнения внутреннего объема корпусов разными материалами. Так, часто корпуса заполняют инертными газами (например, аргоном) для исключения из объема влаги и предотвращения окислительных процессов, жидкими веществами или вазелинами; часто внутри корпуса помещают геттеры для регулирования влажности среды в корпусе.

Герметизация вывода корпуса блока осуществляется путем спая ковара со стеклом. В блоках могут быть использованы гермовыводы, представляющие либо одиночный металлоглазый вывод (рис. 10.2), либо групповую колодку выводов, впаянную в корпус блока (рис. 10.3).

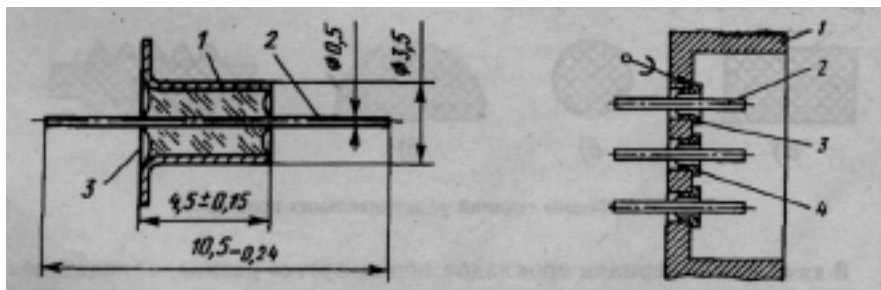


Рис. 10.2. Конструкция одиночного металлоглазого гермовывода:
1 — оболочка из ковара; *2* — проволока из ковара; *3* — стеклянный изолятор

Рис. 10.3. Вариант установки гермопереходников в корпус блока: *1* — корпус; *2* — проволока из ковара; *3* — припой ПОС-61; *4* — оболочка из ковара

Герметизация корпусов РЭС может быть выполнена сваркой, пайкой или с помощью эластичных уплотнений. Первые два способа герметизации используются в случае жестких требований к герметичности блоков, состоящих из негерметизированных ячеек. Высокую технологичность имеет вакуумно-плотная герметизация корпусов блоков паяным швом по всему периметру корпуса (см. разд. 3).

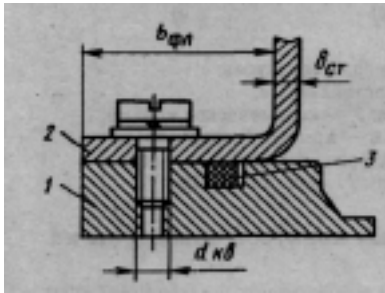


Рис. 10.4. Герметизация блока уплотнительной прокладкой:
1 — корпус; 2 — кожух;
3 — прокладка

При разъемном способе герметизации в паз кожуха или корпуса изделия укладывается прокладка, которая при поджатии уплотняет стык между кожухом и корпусом (рис. 10.4). Уплотнительная прокладка, равномерно поджимаясь по всей поверхности крепежными винтами, осуществляет герметизацию, находясь в сжатом состоянии и заполняя все сечения паза. Утечка газов через уплотнение при сжатии прокладки на 25...30% от ее первоначальной высоты происходит только за счет диффузии.

Большие усилия при сжатии не рекомендуются, поскольку из-за интенсивного старения прокладка быстро выходит из строя.

Форма поперечного сечения прокладки может быть различной. Наиболее распространены прокладки сечений, показанные на рис. 10.5, а, б, в, так как они просты в изготовлении и выдерживают широкий диапазон давлений. Гребенчатая прокладка (рис. 10.5, г) используется в аппаратуре с большим сроком службы.

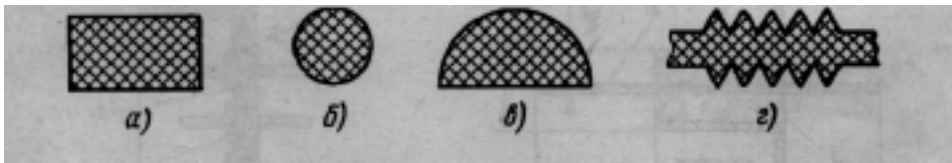


Рис. 10.5. Формы сечений уплотнительных прокладок

В качестве материала прокладок используется резина, обладающая высокой эластичностью, податливостью и способностью затекать в мельчайшие углубления и неровности. Для уплотнительных прокладок можно применять следующие марки резины: ИРП-1267, ИРП-1338, ИРП-1354. Перед сборкой прокладка смазывается тонким слоем масла ЦИАТИМ-221.

Ширина фланца определяется по формуле

$$b_{\text{ФЛ}} = 2\delta_{\text{СТ}} + 2,6d_{\text{КВ}},$$

где $\delta_{\text{СТ}}$ — толщина стенки корпуса; $d_{\text{КВ}}$ — диаметр крепежного винта.

Площадь сечения прокладки S вычисляется из выражения

$$S_{\text{пр}} = (1,1 \dots 1,2) S_{\text{п}}$$

где $S_{\text{п}}$ — площадь сечения паза.

При расчете герметизации определяется усилие обжатия прокладки, на основе которого вычисляются усилие затягивания и количество крепежных винтов.

Герметизация внешних электрических связей РЭС осуществляется с помощью металлостеклянных гермовводов, впаиваемых в стенку блока, опайкой соединителей (например, высокочастотных) по периметру, полимерной герметизацией низкочастотных соединителей. Электрические соединители герметизируются установкой на прокладки (рис. 10.6, а), заливкой компаундами (рис 10.6, б).

Надо отметить, что уплотнительными прокладками, устанавливаемыми в крупных приборных корпусах, трудно обеспечить абсолютную герметичность. Однако

они в достаточной мере предохраняют внутреннюю полость прибора от влажного воздуха или воды, обеспечивая более благоприятные условия работы изделий во влажной среде, особенно если при этом в приборах используют средства осушения. Наиболее эффективным способом осушки внутренней полости изделия в период эксплуатации является использование влагопоглотителей. Широкое применение получил силикагель, который в размельченном виде помещают в патроны, футляры или мешочки, устанавливаемые внутри изделия. Осушительный патрон предусматривает замену силикагеля при полном насыщении его влагой. Контроль за влагонасыщением силикагелем производится по изменению его цвета. Для этого силикагель окрашивают 3%-м водным раствором хлористого кобальта, тогда при полном насыщении влагой он принимает розовый цвет, а после просушки — синий.

Капсулирование широко используется для герметизации элементной базы и функциональных ячеек РЭС. В зависимости от особенно-

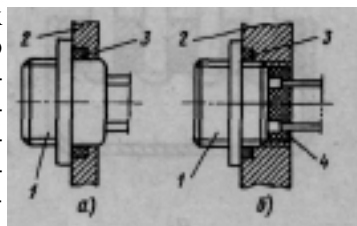


Рис. 10.6. Герметизация соединителя с помощью уплотнительной прокладки (а), уплотнительной прокладки и заливки компаундом (б): 1 — соединитель; 2 — корпус; 3 — прокладка; 4 — компаунд

стей конструкции изделий, в частности расположения выводов, существуют два вида корпусов с использованием металлической капсулы:

с вертикальным расположением выводов (рис. 10.7, *а*) — в этом случае поверхность изделия контактирует с герметизирующим компаундом;

с выводами в одной плоскости с подложкой (рис. 10.7, *б, в*) — в этом случае герметизирующий материал не контактирует с поверхностью изделия.

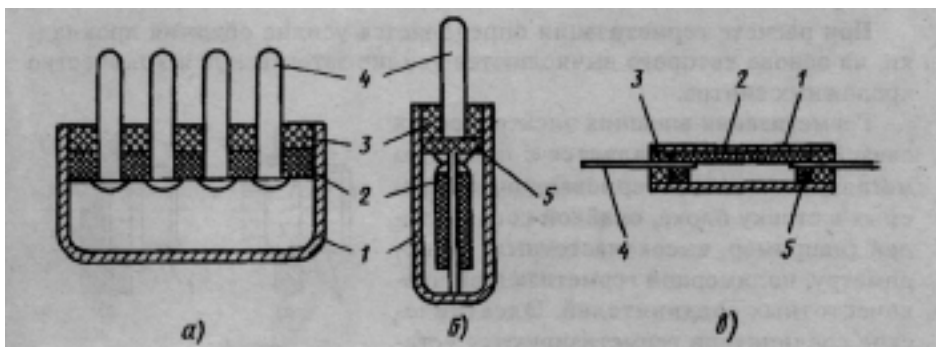
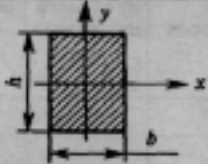
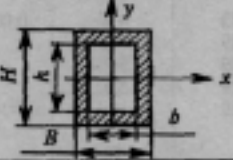
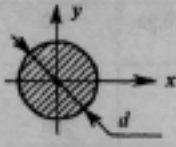



Рис. 10.7. Примеры герметизации способом капсулирования: *а* — изделие со штыревыми выводами; *б* — односторонний пенальный корпус; *в* — двухсторонний; 1 — капсула; 2 — подложка; 3 — герметизирующий компаунд; 4 — вывод; 5 — прокладка

Наиболее широкое распространение получили корпуса первого вида [60], где надежная герметизация изделий определяется герметичностью узлов «вывод — компаунд (подложка)» и «капсула — компаунд», а также адгезией компаунда к поверхности платы. При герметизации капсулированием изделие помещается в корпус (капсулу) выводами наружу. Свободный торец капсулы и выводы заливаются компаундом. Для герметизации изделий микроэлектроники в металлополимерные корпуса наибольшее распространение получил жидкий компаунд ЭК-16. Однако он недостаточно пригоден для организации автоматизированного производства малогабаритных изделий. Это объясняется трудностью дозировки больших порций компаунда, низкой жизнеспособностью компаунда. Эффективнее применять порошкообразные компаунды. В этом случае появляется возможность осуществлять предварительную дозировку компаунда путем изготовления из него калиброванных по массе и размерам таблеток. Герметизация порошкообразными компаундами в виде таблеток позволяет автоматизировать процесс сборки и герметизации изделий.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П.1

Форма сечения	Расчетные соотношения
	$J_x = bh^3/12$ $J_y = hb^3/12$ <p>При $b = h$ $J_x = J_y = b^4/12$</p>
	$J_x = (BH^3 - bh^3)/12$ $J_y = (HB^3 - hb^3)/12$
	$J_x = J_y = 0,05d^4$
	$J_x = J_y = 0,05(D^4 - d^4)$

Формулы расчета осевых моментов инерции простейших сечений

Физические параметры некоторых материалов

Таблица П.2

Материал	Параметры материала				
	Плотность ρ , г/см ³	Модуль упругости E 10 ¹¹ , Па	Коэффициент Пуассона ν	Предел прочности при изгибе $\sigma_{\text{изг}}$, МПа	Коэффициент демпфирования S_0
1	2	3	4	5	6
Сплавы алюминия: Д16, В95, АМц, АЛ2, АЛ9, АД1	2,8 2,76 2,85 2,73 2,65 2,65 2,71	71 71 71 71 71 72 69,6	0,29 0,29 0,29 0,29 0,29	410 520 560 520 180 200 58	0,05...0,013 85
Сплавы титана: ВТ10, ВТ2	4,4...4,9	105	0,25...0,33	950	
Сплавы магниевые: МА18, МА2-1	1,48 1,8	45 46		180 280	0,0063...0,0125
29НК (ковар)	8,35	145		480	
Сталь 20, Сталь	7,82	200	0,25	420...61	
ЗОХГСА	7,85	198	0,36	1080	
Бронза	8,27	75...141	0,31	200...	
Латунь	8,5	106...110	0,41	320..	0,03...0,06
Ситалл СТ50-1	2,65	180	0,26	176	
Керамика 22ХС	3,86	255	0,26	85	
Брокерит-9	2,83	320		100	
Поликор	3,98	392	0,26	200	
Фторопласт-4	2,25	0,47...0,85	22		
Стеклотекстолит: СФ, СТЭФ	1,85 2,47	30,2 32	0,22 0,279	75 75	0,02...0,1 0,02...0,1
Гетинакс	1,4		11...14		0,03...0,08

Таблица П.3

Коэффициенты теплопроводности наиболее часто применяемых материалов

Наименование материала	λ , Вт/(м К)
1. Алюминиевые сплавы	160...180
2. Брокеритовая керамика	180...200
3. Воздух	0,025
4. Германий	52...58
5. Гетинакс	0,15...1,18
6. Кремний	120...130
7. Ковар Н29К18	21
8. Керамика 22ХС	18...20
9. Латунь	100...200
10. Магниеые сплавы	120...127
11. Медь	380...390
12. Олово	64
13. Пенопласт	0,04...0,06
14. Резина	0,11-0,16
15. Ситалл СТ - 50 - 1	1,1...1,6
16. Стекло кварцевое	1,4...1,5
17. Сталь конструкционная	45...50
18. Слюда	0,43...0,6
19. Стеклотекстолит	0,47...1,18
20. Титановые сплавы	14...16
21. Клеи и компаунды	0,15...0,3
22. Поликор	25...38

Таблица П.4

Степень черноты различных поверхностей

Материал и состояние поверхности	Температура, °С	Степень черноты
Алюминий (полированная пластина)	200...600	0,04...0,06
Алюминий (сильно окислен)	35...500	0,2...0,31
Силуминовое литье (в песчаной форме)	100...500	0,33...0,31
Силуминовое литье (в кокильной форме)	100...500	0,16...0,23
Дюралюминий Д16	50...350	0,37...0,41
Сталь полированная	100	0,066
Сталь листовая холоднокатаная	93	0,075...0,085
Сталь листовая сильно окисленная	25	0,8...0,82
Латунь прокатанная	22	0,06
Латунь тусклая	50...350	0,22
Латунь хромированная полированная	100	0,075
Медь шабрённая до блеска	22	0,072
Медь (пластина после нагрева до 600°С)	200	0,57
Олово, луженое кровельное железо	100	0,07...0,08
Цинк, оцинкованное железо	25	0,23...0,27
Краски эмалевые, лаки различных цветов	20... 100	0,92
Краски матовые различных цветов	100	0,92...0,96
Лак чёрный матовый	40... 100	0,96...0,98
Муар серый, чёрный	20	0,86...0,9
Краска защитно-зеленая	20	0,9
Краска бронзовая	100	0,51
Краска алюминиевая	100	0,28
Алюминиевая фольга	100	0,09

Таблица П.5

Параметры сухого воздуха

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, \cdot 10^{-3},$ Дж/(кг \cdot °C)	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м \cdot °C)	$\nu \cdot 10^6,$ м ² /с	P_2
-50	1,584	,010	2,04	9,23	0,728
-20	1,395	,010	2,28	12,79	0,716
0	1,293	,000	2,44	13,28	0,707
+ 10	1,247	,000	2,51	14,16	0,705
+ 20	1,205	,000	2,60	15,06	0,703
+ 30	1,165	,000	2,68	16,00	0,701
+ 40	1,128	,000	2,76	16,96	0,699
+ 50	1,093	,000	2,83	17,95	0,698
+ 60	1,060	,000	2,9	18,97	0,696
+ 70	1,029	,000	2,97	20,02	0,694
+ 80	1,000	,000	3,05	21,09	0,692
+ 90	0,972	,000	3,13	22,10	0,690
+ 100	0,946	,000	3,21	23,13	0,688

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ожегов С.И.* Словарь русского языка. — М.: Русский язык, 1984.
2. Конструирование и расчет БГИС, микросборок и аппаратуры на их основе/ Г.В. Алексеев, В.Ф. Борисов, Т.Л. Воробьева и др.; Под ред. Б.Ф. Высоцкого. — М.: Радио и связь, 1981.
3. *Высоцкий Б.Ф., Назаров А.С.* Радиозлектронная аппаратура/Энциклопедия «Электроника». — М.: Советская энциклопедия, 1991.
4. *Коледов Л.А., Заводя» А.В., Королькевич В.А.* Поверхностный монтаж компонентов — новое направление в конструировании и производстве МЭА/Зарубежная электронная техника. 1988. Вып. 3 (322), 4 (323).
5. Основы проектирования микроселектронной аппаратуры/А.Г. Алексенко, С.С. Бадурин, Л.Г. Барулин и др.; Под ред. Б.Ф. Высоцкого. — М.: Сов. радио, 1977.
6. *Луткин Л.С.* Проектирование радиосистем и радиоустройств. — М.: Радио и связь, 1976.
7. Методические указания к дипломному проектированию по специальности «Конструирование и производство РЭА»/В.Ф. Борисов, Б.Ф. Высоцкий, А.С. Назаров, Л.М. Федотов. — М.: МАИ, 1979.
8. *Болховитинов В.Ф.* Пути развития летательных аппаратов. — М.: Оборонгиз, 1962.
9. Конструирование аппаратуры на БИС и СБИС/В.Ф. Борисов, Ю.И. Боченков, Б.Ф. Высоцкий и др.; Под ред. Б.Ф. Высоцкого и В.Н. Сретенского. — М.: Радио и связь, 1989.
10. Компоновка и конструкции микроселектронной аппаратуры/П.И. Овсищев, И.И. Лившиц, А.К. Орчинский и др.; Под ред. Б.Ф. Высоцкого, В.Б. Пестрякова и О.А. Пятлина. — М.: Радио и связь, 1982.
11. *Ушкар М.Н.* Микропроцессорные устройства в радиозлектронной аппаратуре/Под ред. Б.Ф. Высоцкого. — М.: Радио и связь, 1988.
12. *Дитрих Я.* Проектирование и конструирование: Системный подход; Пер. с польского. — М.: Мир, 1981.
13. *Преснухин Л.Н., Шахнов В.А.* Проектирование электронных вычислительных машин и систем. — М.: Высшая школа, 1986.
14. *Никулин Н.В., Назаров А.С.* Радиоматериалы и радиокомпоненты. — М.: Высшая школа, 1986.
15. *Назаров А.С., Хахалкин В.Н.* Разделение приемного устройства СВЧ на отдельные микросборки с учетом их стыковки/Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 1992. № 2. — Одесса, НПО «Темп».
16. Конструирование микроселектронной аппаратуры/Б.Ф. Высоцкий, А.И. Головин, В.В. Марков и др.; Под ред. Б.Ф. Высоцкого. — М.: Сов. радио, 1975.
17. ОСТ 4Г 0.010.009-76. Аппаратура радиозлектронная. Блоки и ячейки на микросборках и микросхемах. Конструирование.
18. *Дульнев Г.Н., Тарновский Н.Н.* Тепловые режимы электронной аппаратуры. — Л.: Энергия, 1971.
19. *Дульнев Г.Н.* Тепло- и массообмен в радиозлектронной аппаратуре. — М.: Высшая школа, 1984.

20. Глушицкий И.В. Охлаждение бортовой аппаратуры авиационной техники. — М.: Машиностроение, 1987.
21. Резников Г.В. Расчет и конструирование систем охлаждения ЭВМ. — М.: Радио и связь, 1988.
22. Гель П.П., Иванов-Есипович Н.К. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры. — Л.: Энергоатомиздат, 1984.
23. Карпушин В.Б. Виброшумы радиоаппаратуры. — М.: Сов. радио, 1977.
24. Токарев М.Ф., Галицкий Е.Н., Фролов В.А. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Радио и связь, 1984.
25. Кузнецов О.А., Погалов А.И., Сергеев В. С. Прочность элементов микроэлектронной аппаратуры. — М.: Радио и связь, 1990.
26. Несущие конструкции радиоэлектронной аппаратуры/П.И. Овсищев, Ю.В. Голованов, В.П. Ковешников и др.; Под ред. П.И. Овсищера — М.: Радио и связь, 1988.
27. Виброзащита радиоэлектронной аппаратуры полимерными композитами/Ю.В. Зеленов, А.А. Кирилин, Э.Б. Слободник, Е.Н. Талицкий; Под ред. Ю.В. Зеленева — М.: Радио и связь, 1984.
28. Бабаев А.Л., Михайлов А.С. Нормы на параметры электромагнитной совместимости РЭС: Справочник. — М.: Радио и связь, 1990.
29. Гроднев И.Н. Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот. — М.: Связь, 1972.
30. Варне Дж. Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами: Пер. с англ. — М.: Мир, 1990.
31. Мкртчян Ж.А. Основы построения электропитания ЭВМ. — М.: Радио и связь, 1990.
32. Полонский Н.Б. Конструирование электромагнитных экранов для радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1979.
33. Князев А.Д., Кечев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. — М.: Радио и связь, 1989.
34. Гуськов Г.Я., Блинов Г.А., Газаров А.А. Монтаж микроэлектронной аппаратуры. — М.: Радио и связь, 1986.
35. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств: Учеб. для радиотехнических спец. вузов. — М.: Высшая школа, 1990.
36. Шерстнев В.В. Конструирование и микроминиатюризация ЭВА: Учебник для вузов. — М.: Радио и связь, 1984.
37. Базовый принцип конструирования РЭА/Под ред. Е.М. Парфенова. — М.: Радио и связь, 1981.
38. Бобнева М.И. Техническая психология. — М.: Наука, 1966.
39. Попов Г.П. Инженерная психология в радиолокации/Под ред. В.И. Николаева. — М.: Сов. радио, 1971.
40. Костюк В.И., Ходаков В.Е. Системы отображения информации и инженерная психология. — Киев: Вища школа, 1977.
41. Варламов Р.Г. Основы художественного конструирования радио- и электронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1966.
42. ГОСТ 24899-81. Электроприборы и машины бытовые. Символы органов управления. — М.: Изд-во стандартов, 1982.
43. ГОСТ 24505-80. Устройства программного управления. Символы на пультах управления. — М.: Изд-во стандартов, 1982.
44. ГОСТ 26020-80. Шрифты для средств измерения и автоматизации. — М.: Изд-во стандартов, 1981.
45. ГОСТ 23090-78. Аппаратура радиоэлектронная. Правила составления и текст пояснительных надписей и команд. — М.: Изд-во стандартов, 1978.
46. Сомов Ю.С. Композиция в технике. — М.: Машиностроение, 1987.

47. *Шнара П.Е.* Техническая эстетика и основы художественного конструирования. — Киев: Вища школа, 1984.
48. Методика художественного конструирования. Методическое руководство. — М.: ВНИИТЭ, 1983.
49. Художественное конструирование. Проектирование и моделирование изделий промышленности/З.Н. Быков, Г.В. Крюков, Г.Б. Минервин и др.; Под ред. З.Н. Быкова, Г.Б. Минервина — М.: Высшая школа, 1986.
- 50 *Вудсон У., Конновер Д.* Справочник по инженерной психологии для инженеров и художников-конструкторов. — М.: Мир, 1968.
51. *Горобец А.И., Степаненко А.И., Коронкевич В.М.* Справочник по конструированию радиоэлектронной аппаратуры (печатные узлы). — Киев: Техника, 1985.
52. *Пименов А.И.* Снижение массы конструкций РЭА. — М.: Радио и связь, 1981.
53. Конструкционные материалы: Справочник/Б.Н. Арзамасов, В.А. Бромстрем, Н.А. Буше и др.; Под ред. Б.Н. Арзамасова. — М.: Машиностроение, 1990.
54. ГОСТ 26883-86 (СТ СЭВ 5127-85). Внешние воздействующие факторы. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1989.
55. *Новиков М.И., Федоров А.М.* Влагостойкость радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Радио и связь, 1980.
56. *Астафьев А.В.* Окружающая среда и надежность радиотехнической аппаратуры. — М.-Л.: Энергия, 1965.
57. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники/В.М. Кулаков, Е.А. Ладьгин, В.И. Шаховцев и др.; Под ред. Е.А. Ладьгина. — М.: Сов. радио, 1980.
58. *Мырова Л.О., Четвиженко А.З.* Обеспечение радиационной стойкости аппаратуры связи. — М.: Радио и связь, 1983.
59. *Фридман Е.И.* Герметизация радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Энергия, 1978.
60. *Волков В.А.* Сборка и герметизация микрослектронных устройств. — М.: Радио и связь, 1982.
61. *Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е.* Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА. — М.: Сов. радио, 1976.
62. *Дульнев Г.Н., Семьякин Э.М.* Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. — М.: Энергия, 1968.
63. ОСТ 4ГО.010.030. Установка навесных элементов на печатные платы. Части I и II.
64. Прочность, устойчивость, колебания. В 3-х т. / В.В. Волошин, А.С. Вольмир, М.Ф. Диментберг и др. Т.3. — М.: Машиностроение, 1968.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
В. 1. Терминология и классификация РЭС	4
В.2. Тенденции развития конструкций РЭС	8
1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ РЭС	17
1.1. Требования к конструкциям РЭС и показатели их качества	17
1.2. Системный подход к конструированию РЭС	24
1.3. Ограничения на показатели качества конструкций РЭС	34
1.4. Правила и принципы микроэлектронного конструирования РЭС	40
1.5. Комплексная миниатюризация и мультиплексирование РЭС	43
1.6. Многоканальность и цифровизация в конструкциях РЭС	45
2. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС.....	47
2.1. Специализация конструкторских организаций	47
2.2. Последовательность создания РЭС	49
2.3. Стадии разработки изделия.....	51
3. КОНСТРУИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК И БЛОКОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ.....	55
3.1. Задачи конструирования радиоэлектронных средств	55
3.2. Конструирование цифровых функциональных ячеек и блоков на печатных платах	61
3.3. Конструирование цифровых функциональных ячеек и блоков на бескорпусных микросборках	69
3.4. Конструирование аналоговых субблоков и блоков РЭС	79
3.5. Конструирование СВЧ-модулей	85
3.6. Влияние объема и формы блоков РЭС на показатели качества конструкции	88
3.7. Выбор оптимальной формы блока РЭС по нескольким критериям качества	93
3.8. Количественная оценка массы комплекса микроэлектронных средств на ранних стадиях проектирования	98
3.9. Распределение ресурса масс и объемов в конструкциях РЭС.....	104
3.10. Перспективные направления конструирования РЭС	107
4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ И ЗАЩИТА КОНСТРУКЦИЙ РЭС	115
4.1. Классификация механических воздействий	115
4.2. Моделирование механических воздействий на конструкции РЭС	120
4.3. Расчет показателей вибропрочности конструкций РЭС	128
4.4. Расчет ударопрочности конструкций РЭС	150
4.5. Основы расчета виброизоляции конструкций РЭС	154
4.6. Основы расчета удароизоляции конструкций РЭС	161
4.7. Конструктивные способы защиты РЭС от механических воздействий	167

5. ТЕПЛООБМЕН В КОНСТРУКЦИЯХ РЭС И РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА.....	170
5.1. Основы теории теплообмена в РЭС.....	171
5.2. Методы теплового моделирования и расчета тепловых режимов конструкций РЭС	193
5.3. Системы охлаждения конструкций РЭС	207
5.4. Особенности конструкций РЭС с кондуктивными системами охлаждения .	211
5.5. Тепловые режимы конструкций РЭС с естественным воздушным охлаждением	219
5.6. Тепловое моделирование конструкций РЭС с принудительным воздушным охлаждением	233
5.7. Тепловое моделирование конструкций РЭС с принудительным жидкостным охлаждением.....	238
5.8. Тепловые трубы	241
5.9. Термоэлектрическое охлаждение конструкций РЭС	243
6. КОНСТРУИРОВАНИЕ РЭС С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ	245
6.1. Проблема электромагнитной совместимости	245
6.2. Экранирование	247
6.3. Фильтрация	258
6.4. Заземление	263
6.5. Расчет конструкций экранов	266
7. КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ	277
7.1. Особенности конструирования электрических соединений	277
7.2. Помехи и связи между элементами РЭС	278
7.3. Помехи при соединении элементов РЭС короткими линиями связи . . .	285
7.4. Помехи при соединении элементов РЭС длинными линиями связи . . .	287
7.5. Расчет электрических параметров линий связи	290
7.6. Конструирование электрических соединений	297
8. ВОПРОСЫ ЭРГОНОМИКИ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ РЭС	300
8.1. Человекомашинные системы, их классификация и свойства	300
8.2. Сенсорный вход оператора и его параметры	307
8.3. Моторный выход и рабочая зона оператора	314
8.4. Средства отображения информации	315
8.5. Выбор формы, композиции, фактуры и цвета лицевой панели	323
9. КОНСТРУИРОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ И НЕСУЩИХ ОСНОВАНИЙ РЭС.....	331
9.1. Расчет геометрических размеров коммутационных оснований	331
9.2. Выбор материалов и расчет элементов печатных плат.....	337
9.3. Конструирование несущих конструкций блоков РЭС . . .	342
9.4. Выбор материалов корпусов	345
9.5. Корпуса РЭС из волокнистых композиционных материалов	350
10. ЗАЩИТА РЭС ОТ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ	352
10.1. Общие сведения о внешних воздействующих факторах.....	352
10.2. Особенности работы РЭС в условиях воздействия факторов космического пространства.....	358
10.3. Защита от воздействий внешней среды	360
10.4. Герметизация корпусов микросхем и РЭС	362
ПРИЛОЖЕНИЯ	367
ЛИТЕРАТУРА	372

Учебное издание

Борисов Валентин Федорович
Лавренов Олег Павлович
Назаров Андрей Сергеевич
Чекмарев Анатолий Николаевич

**КОНСТРУИРОВАНИЕ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Редактор *Г. И. Борисова*
Художественный редактор *В. И. Володина*
Компьютерная верстка *О. Г. Лавровой*
Обложка *И.А. Гавриченко*
Корректор *В.В. Сомова*

ИБ 143

Лицензия ЛР № 040211 от 15.01.92 г.
Сдано в набор 21.12.93 . Подписано в печать 7.11.95. Формат 60x84
1/16.

Бумага кн.-журн. Гарнитура Тайме.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 22,09. Уч.-изд. л. 21,89.
Тираж 1500 экз. Заказ 2299. С. 140.

Издательство МАИ
125871, Москва, Волоколамское шоссе, 4
Типография издательства МАИ, 125871, Москва, Волоколамское
шоссе, 4