

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

**РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА  
И ОСНОВЫ ЕЁ КОНСТРУКТОРСКОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

*Рекомендовано УМО вузов Республики Беларусь  
по образованию в области информатики и радиоэлектроники  
в качестве учебно-методического пособия для студентов учреждений,  
обеспечивающих получение высшего образования по специальностям  
«Моделирование и компьютерное проектирование РЭС»  
и «Проектирование и производство РЭС»*

Под редакцией С. М. Боровикова

Минск БГУИР 2009

УДК 621. 396. 6(075.8)  
ББК 32.844 я73  
Р15

**Р е ц е н з е н т ы :**

заведующий кафедрой радиоэлектроники  
Минского государственного высшего радиотехнического колледжа,  
кандидат технических наук, доцент Р. Г. Хехнёв;

начальник отдела специального конструкторского управления  
Республиканского унитарного предприятия  
«Научно-исследовательский институт средств автоматизации»,  
кандидат технических наук В. И. Емельянов

**А в т о р ы :**

Н. И. Каленкович, С. М. Боровиков, А. М. Ткачук, Н. С. Образцов

**Радиоэлектронная** аппаратура и основы её конструкторского  
P15 проектирования : учеб.-метод. пособие / Н. И. Каленкович [и др. ] ; под ред.  
С. М. Боровикова. – Минск : БГУИР, 2009. – 187 с. : ил.  
ISBN 978-985-488-364-9

Рассмотрены классификация и особенности конструкторского исполнения современной радиоэлектронной аппаратуры. Приводится общая методология конструкторского проектирования РЭС и их составных частей: печатных плат, несущих конструкций, лицевых панелей. Излагаются методы защиты конструкций РЭС от действия дестабилизирующих факторов: повышенной температуры, влаги и механических нагрузок. Рассмотрены вопросы надёжности элементной базы РЭС и методы оценки показателей надёжности проектируемых устройств.

**УДК 621. 396. 6(075.8)  
ББК 32.844 я73**

**ISBN 978-985-488-364-9**

© УО «Белорусский государственный  
университет информатики  
и радиоэлектроники», 2009

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ\*

БИС – большая интегральная схема  
БНК – базовая несущая конструкция  
ВОКС – волоконно-оптические кабели и соединители  
ГИС – гибридная интегральная схема  
ГФ – гетинакс фольгированный  
ДПП – двусторонняя печатная плата  
ЕСКД – единая система конструкторской документации  
ИМС – интегральная микросхема  
ИС – интегральная схема  
КД – конструкторская документация  
МВ – механические воздействия  
НИР – научно-исследовательская работа  
ОЗУ – оперативное запоминающее устройство  
ОКР – опытно-конструкторская работа  
ОУ – операционный усилитель  
ПЗУ – постоянное запоминающее устройство  
ПП – печатная плата  
ППЗУ – электрически программируемое ПЗУ  
РПЗУ – перепрограммируемое (репрограммируемое) ПЗУ  
ППП – полупроводниковые приборы  
РДП – рельефная двухслойная плата  
РП – рельефная плата  
РЭА – радиоэлектронная аппаратура  
РЭМ – радиоэлектронный модуль  
РЭС – радиоэлектронное средство  
РЭУ – радиоэлектронное устройство  
РЭФУ – радиоэлектронный функциональный узел  
САПР – система автоматизированного проектирования  
СБИС – сверхбольшая интегральная схема  
СВЧ – сверхвысокая частота  
СФ – стеклотекстолит фольгированный  
ТЗ – техническое задание  
ТКЕ – температурный коэффициент ёмкости  
ТКС – температурный коэффициент сопротивления  
ТП – технический проект  
ТТ – технические требования  
ЭА – электронная аппаратура  
ЭП – эскизный проект

\* В зависимости от контекста приведённые сокращения могут использоваться в единственном и во множественном числе.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
<b>1. Основные понятия и определения. Классификация РЭС .....</b>	<b>8</b>
1.1. Основные задачи и проблемы конструирования .....	8
1.2. Эволюция конструкций РЭС.....	10
1.3. Виды изделий и элементная база РЭС.....	12
1.3.1. Общие сведения .....	12
1.3.2. Резисторы постоянные.....	13
1.3.3. Резисторы переменные .....	18
1.3.4. Конденсаторы постоянной ёмкости.....	21
1.3.5. Интегральные микросхемы .....	28
1.3.6. Транзисторы и диоды .....	34
1.3.7. Электрические соединители.....	35
1.4. Конструкция РЭС и конструкторская иерархия .....	40
1.5. Классификация РЭС .....	41
1.6. Классы исполнения РЭС по условиям их эксплуатации .....	44
<b>2. Методология конструкторского проектирования.....</b>	<b>45</b>
2.1. Особенности процесса конструирования .....	45
2.2. Стадии разработки РЭС.....	46
2.3. Организация процесса конструирования .....	47
2.4. Особенность системного подхода к проектированию конструкций РЭС .....	48
<b>3. Материалы и несущие конструкции РЭС.....</b>	<b>50</b>
3.1. Общие сведения о несущих конструкциях РЭС .....	50
3.2. Конструктивные разновидности корпусов интегральных микросхем .....	52
3.3. Выбор материалов для конструктивных элементов РЭС .....	54
3.4. Разновидности и особенности разъёмных и неразъёмных соединений .....	56
3.5. Технологичность конструкций РЭС .....	57
3.5.1. Общие сведения .....	57
3.5.2. Показатели технологичности .....	57
3.5.3. Методы обеспечения и оценка технологичности.....	58
<b>4. Проектирование печатного монтажа РЭС.....</b>	<b>60</b>
4.1. Классификация методов электрических соединений в конструкциях РЭС.....	60
4.2. Основные определения и типы печатных плат .....	61
4.3. Конструктивные характеристики печатных плат .....	62
4.4. Электрические характеристики печатных плат .....	64
4.5. Рельефные печатные платы.....	65
4.6. Материалы оснований печатных плат .....	66
4.7. Печатный монтаж и методы его получения .....	68
4.8. Односторонние, двусторонние и многослойные печатные платы .....	70

4.9. Методы конструирования печатных плат .....	71
4.10. Последовательность процесса конструирования печатных плат.....	72
4.11. Конструктивные покрытия.....	73
4.12. Выбор и размещение отверстий.....	73
4.13. Маркировка печатных плат.....	74
4.14. Межконтактные соединения из объёмного провода .....	75
<b>5. Компоновка РЭС .....</b>	<b>77</b>
5.1. Задачи компоновки.....	77
5.2. Оценка компоновочных характеристик РЭУ .....	77
5.3. Требования к компоновочным решениям .....	80
5.4. Способы выполнения компоновочных работ .....	81
5.5. Компоновка РЭУ и рабочего места оператора с учётом требований эргономики.....	82
5.6. Проектирование лицевых панелей .....	85
<b>6. Защита конструкций РЭС от дестабилизирующих факторов .....</b>	<b>86</b>
6.1. Классификация дестабилизирующих факторов.....	86
6.2. Механические воздействия .....	87
6.2.1. Общие сведения.....	87
6.2.2. Параметры гармонических вибраций.....	88
6.2.3. Воспроизведение механических воздействий на испытательных стендах.....	91
6.2.4. Динамические характеристики конструкций РЭС.....	93
6.2.5. Реакция конструкций РЭС на механические воздействия .....	99
6.2.6. Защита конструкций РЭС от вибраций .....	103
6.2.7. Защита конструкций РЭС от ударов, линейных нагрузок и акустических шумов.....	107
6.2.8. Защита РЭС при транспортировании .....	108
6.2.9. Общие рекомендации по защите РЭС от механических воздействий.....	111
6.3. Тепловой режим конструкций РЭС .....	113
6.3.1. Общие сведения.....	113
6.3.2. Способы охлаждения РЭС .....	115
6.3.3. Оценочный выбор способа охлаждения РЭС.....	117
6.4. Защита конструкций РЭС от воздействия влаги.....	119
6.4.1. Источники и пути проникновения влаги.....	119
6.4.2. Способы влагозащиты РЭС.....	120
<b>7. Надёжность РЭА и их элементов.....</b>	<b>125</b>
7.1. Надёжность как свойство РЭА и элементов .....	125
7.2. Показатели надёжности РЭА и их элементов .....	130
7.3. Надёжность элементов .....	140
7.4. Расчёт показателей надёжности проектируемых РЭУ .....	143
7.5. Пример расчёта показателей безотказности РЭУ .....	162

<b>8. Техническая документация</b> .....	167
8.1. Государственные стандарты .....	167
8.2. Конструкторские документы .....	168
8.3. Схемная документация.....	169
8.4. Схемы электрические принципиальные.....	170
8.5. Текстовые документы.....	171
8.6. Комплектность конструкторских документов .....	172
8.7. Технические требования и техническая характеристика .....	174
8.8. Размеры, допуски и посадки на чертежах .....	174
8.9. Параметры шероховатости и их обозначение на чертежах.....	178
8.10. Сборочные чертежи и их содержание .....	179
8.11. Спецификация и порядок её оформления .....	181
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	184
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....	185

Библиотека БГУМР

## ВВЕДЕНИЕ

Для выбора удачных конструкторских решений РЭС студентам, обучающимся по специальностям «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС» и «Проектирование и производство РЭС», необходимо иметь чёткое представление о классификации РЭС, организации процесса конструкторского проектирования, основных компоновочных схемах конструкций РЭС, технической документации, конструкционных системах РЭС, материалах и элементной базе, электрических соединениях в конструкциях РЭС, организации защиты от дестабилизирующих факторов, методах оценки показателей надёжности и т.д.

Предлагаемое учебно-методическое пособие предназначено прежде всего для закрепления знаний и навыков, получаемых студентами специальностей «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС» и «Проектирование и производство РЭС» при освоении учебной дисциплины «Конструирование РЭС» («Конструирование РЭУ»). После прослушивания цикла лекций по указанной дисциплине данное издание может служить своего рода справочным пособием, в котором кратко излагаются общие сведения о конструкциях РЭС и рассматриваются основы конструкторского проектирования. Что касается выбора методов защиты конструкций РЭС от действия дестабилизирующих факторов и расчёта показателей надёжности проектируемых устройств, то предлагаемый материал позволяет сделать это на уровне, пригодном для инженерных применений. Отметим, что техническая документация сопровождает конструкцию РЭС на всех жизненных этапах, начиная от проектирования, продолжая производством и эксплуатацией и заканчивая (при необходимости) утилизацией. Однако в методическом плане авторы сочли оправданным вопросы разработки технической документации систематизировать и привести в отдельном заключительном разделе данной работы.

Пособие предназначено для студентов специальностей «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС» и «Проектирование и производство РЭС», однако в полной мере может быть использовано студентами других специальностей, учебные планы которых включают дисциплины конструкторского профиля, в определённой степени имеющие обзорный характер. Такими специальностями являются «Радиоэлектронные системы», «Радиоэлектронная защита информации», «Медицинская электроника», «Оптоэлектронные системы и технологии», «Экономика и управление на предприятии», «Инженерно-психологическое обеспечение информационных технологий» и др. Учебные планы некоторых из указанных специальностей не содержат учебных дисциплин по изучению элементной базы конструкций РЭС, поэтому авторы включили в пособие учебный материал по типовым элементам: резисторам, конденсаторам, полупроводниковым приборам, интегральным микросхемам, соединителям. Авторы надеются, что данное пособие в значительной степени поможет студентам указанных специальностей в освоении учебных дисциплин конструкторского профиля.

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ. КЛАССИФИКАЦИЯ РЭС

## 1.1. Основные задачи и проблемы конструирования

Цель процесса конструирования – спроектировать малогабаритную, высокоэффективную и надёжную аппаратуру, производство и эксплуатация которой потребуют ограниченного расхода трудовых, энергетических и материальных ресурсов. Для достижения этой цели решают, как правило, четыре основные задачи конструирования:

- комплексная микроминиатюризация;
- обеспечение высокой надёжности;
- защита от дестабилизирующих факторов (тепло, влага, механические воздействия и др.);
- повышение технологичности.

При решении первой задачи – *комплексная микроминиатюризация РЭС* – ищут резервы миниатюризации всех составных частей изделия, не ограничиваясь только узлами, в которых можно применить интегральные микросхемы (ИМС), т.е. элементной базы, системы питания, охлаждения, автоматики и т.д.

Решение задачи комплексной микроминиатюризации РЭС начинается с формирования технических требований к проектируемому изделию в отношении максимального снижения габаритов, массы и энергопотребления. Это решение должно осуществляться по схемотехническому и конструкторскому направлениям взаимосвязанно и согласованно. Конструкторское направление включает решение трёх основных вопросов комплексной микроминиатюризации:

- структура конструкции РЭС;
- материалы;
- элементная база.

При выборе оптимальной структуры конструкции РЭС по критерию комплексной микроминиатюризации необходимо использовать большие и сверхбольшие интегральные схемы (БИС и СБИС), волоконно-оптические кабели и соединители (ВОКС).

При выборе материалов для несущих конструкций и элементов необходимо применять легкие высокопрочные материалы, например алюминиевые и магниевые сплавы.

Комплексная микроминиатюризация элементной базы – наиболее сложный вопрос, особенно в отношении исполнительных элементов автоматики и коммутации.

Тесно связанной с комплексной микроминиатюризацией является вторая задача – *обеспечение высокой надёжности РЭС*. В последние десятилетия проблема надёжности РЭС заметно обострилась. Объясняется это следующим.

1. РЭС заметно усложнились в схемотехническом отношении. Прослеживается тенденция перехода на цифровые принципы формирования и обра-



ботки сигналов, а это усложняет схемотехническое решение РЭУ примерно на порядок (в десять раз).

2. Ужесточились условия, в которых эксплуатируется современная радиоэлектронная аппаратура. Они часто характеризуются большим перепадом температур, высоким или низким давлением, наличием механического воздействия и т.д.

3. Повысились требования к точности функционирования РЭС.

4. Повысилась «цена» отказа РЭУ: он может привести к серьёзным техническим и экономическим потерям. В ряде случаев человек-оператор не имеет непосредственного контакта с РЭС (электронные датчики контроля хода технологических процессов в агрессивных средах, РЭУ на непилотируемых летательных объектах и т.п.).

Достижения микроэлектронной технологии позволили получить изделия большой степени интеграции (большие интегральные схемы – БИС) и сверхбольшой степени интеграции (сверхбольшие интегральные схемы – СБИС), обладающие высоким уровнем надёжности, что способствует решению проблемы обеспечения надёжности РЭС (табл. 1.1). Напомним, под степенью интеграции понимают величину  $k = \lg(N)$ , округлённую до ближайшего большего целого числа, где  $N$  – количество элементов в ИМС.

Таблица 1.1

Надёжность ИМС в зависимости от количества элементов (степени интеграции)<sup>1</sup>

Количество элементов в ИМС	Степень интеграции	Название ИМС, используемое в технической литературе	Усреднённое значение интенсивности отказов, $\times 10^{-6}$ 1/ч
До 10	1	ИМС малой степени интеграции	0,014
От 11 до 100	2	ИМС малой степени интеграции	0,018
От 101 до 10 <sup>3</sup>	3	ИМС средней степени интеграции	0,023
От 1001 до 10 <sup>4</sup>	4	ИМС большой степени интеграции или БИС	0,089
От 10 001 до 10 <sup>5</sup>	5	ИМС большой степени интеграции или БИС <sup>2</sup>	0,174
От 10 <sup>5</sup> до 10 <sup>6</sup>	6	ИМС сверхбольшой степени интеграции или СБИС	0,340

*Примечания:* 1. Для полупроводниковых цифровых ИМС (кроме ОЗУ и ПЗУ) не в пластмассовых корпусах с уровнем качества изготовления, соответствующим приёмке «5» (общее военное применение – ОВП, ВП).

2. По классификации, используемой в СССР, ИМС с количеством элементов более чем 10<sup>4</sup> относили к СБИС.

Третья задача конструирования РЭС – *защита от дестабилизирующих факторов* (тепло, влага и др.) – возникла как следствие миниатюризации.

Четвёртая задача – *повышение технологичности* – решается на основе унификации и стандартизации. Избыточное разнообразие существующих в настоящее время схемотехнических и конструкторских решений резко снижает технологичность конструкции РЭС. Различают две разновидности технологичности – производственную и эксплуатационную.

*Производственная технологичность* характеризуется минимальными трудовыми и материальными затратами при изготовлении изделия.

*Эксплуатационная технологичность* характеризуется минимальными сроками для предупреждения, обнаружения и устранения неисправностей и отказов в работе аппаратуры.

## 1.2. Эволюция конструкций РЭС

Первые устройства проводной телеграфной связи появились в 1832 г. (русский изобретатель П. Л. Шиллинг). Первый в мире радиоприемник, изобретенный А. С. Поповым, был продемонстрирован в 1895 г.

Конструкционное исполнение первых РЭС напоминало аппаратуру проводной связи (деревянный ящик, монтаж неизолированным проводом, контактирование с помощью винтов). Установка РЭС на суда и автомобили (1925–1935 гг.) привела к необходимости увеличения прочности и экранирования отдельных узлов с помощью металлического шасси, а увеличение серийности выпуска аппаратуры – к созданию конструкторской иерархии (унификации и соподчиненности несущих базовых конструкций). Для защиты аппаратуры танков и самолетов (1935–1945 гг.) были разработаны герметичные корпуса, которые устанавливались на виброизоляторы (амортизаторы). В связи с требованием существенной минимизации массы и объема ракетной аппаратуры (1940–1950 гг.) были созданы микромодули, печатные платы, полупроводниковые приборы, коаксиальные кабели, полосковые линии, интегральные микросхемы. Дальнейшее усложнение аппаратуры в 1960–1970 гг. вызвало появление элементов функциональной микроэлектроники. В настоящее время начинает развиваться наноэлектроника.

Различают следующие поколения РЭС.

*РЭС первого поколения* (20 – 50 гг. прошлого столетия) были построены с использованием электровакуумных ламп, дискретных электрорадиоэлементов (ЭРЭ), проводных электрических связей.

*Ко второму поколению РЭС* (50 – 60 гг.) относят конструкции РЭС на печатных платах и дискретных полупроводниковых приборах.

*К третьему поколению* относятся конструкции на печатных платах и ИМС малой степени интеграции (60 – 70 гг.).

В конструкциях РЭС *четвертого поколения* применяются большие интегральные микросхемы (БИС), многослойные печатные платы, гибкие печатные шлейфы, микрополосковые линии. В интегральной электронике сохраняется главный принцип дискретной электроники – разработка электрической схемы по законам теории цепей. Этот принцип обуславливает рост числа элементов микросхемы и межэлементных соединений по мере усложнения выполняемых ею функций. Однако повышение степени интеграции микросхем и связанное с этим уменьшение размеров элементов имеет определенные пределы из-за возникающих проблем технологии изготовления, теплоотвода и др.

В РЭС пятого поколения находят применение приборы функциональной микроэлектроники. Функциональная микроэлектроника предполагает принципиально новый подход, позволяющий реализовать определенную функцию аппаратуры без применения стандартных базовых элементов, используя физические явления в твердых телах. При этом локальному объёму твердого тела придаются такие свойства, которые необходимы для выполнения данной функции, и промежуточный этап представления этой функции в виде эквивалентной электрической схемы не требуется. Функциональные микросхемы могут выполняться не только на основе полупроводников, но и на основе таких материалов, как сегнетоэлектрики, материалы с фотопроводящими свойствами и др. Для переработки информации можно использовать явления, не связанные с электропроводностью (например, оптические и магнитные явления в диэлектриках, закономерности распространения ультразвука и т.д.). С течением времени изменялось и понятие РЭС.

Рассмотрим *используемую терминологию*. Вначале использовалось понятие *аппаратура*. Аппаратура, в которой с помощью генерирования и преобразования электромагнитных колебаний радиодиапазона решались технические задачи обнаружения целей, наведения, навигации и т.п., называлась *радиотехническая аппаратура*. Развитие ЭВМ, систем автоматики, телеметрии, электро связи привело к появлению понятия *электронная аппаратура*. В практике стал широко использоваться термин *радиоэлектронная аппаратура (РЭА)*. Его можно рассматривать как собирательный термин для обозначения одного или совокупности устройств, в основу функционирования которых положены принципы радиотехники или функционирования которых основано на электронных процессах.

С января 1987 г. в обращение был введен ГОСТ 26632-85 «Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств по функционально-конструктивной сложности. Термины и определения», который установил термин *радиоэлектронное средство (РЭС)*. Согласно этому стандарту под РЭС понимают изделие и его составные части, в основу функционирования которых положены принципы радиотехники и электроники. Конкретное наименование РЭС устанавливается в зависимости от его назначения и принципа действия. В соответствии с этим определением совокупность функционально связанных устройств (радиоэлектронная система, радиоэлектронный комплекс), решающих какую-то конкретную задачу, также представляет собой РЭС. Названный стандарт установил и другие термины в зависимости от функциональной сложности РЭС.

*Радиоэлектронное устройство (РЭУ)* – РЭС, представляющее собой функционально законченную сборочную единицу, выполненную на несущей конструкции, и реализующее функции(ю) передачи, преобразования информации или техническую задачу на их основе.

*Радиоэлектронный функциональный узел (РЭФУ)* – РЭС, представляющее собой функционально законченную сборочную единицу, выполненную на несущей конструкции, реализующее функцию преобразования сигнала и не имеющее самостоятельного эксплуатационного применения.

В зависимости от конструктивной сложности в соответствии с указанным ГОСТом установлены понятия *радиоэлектронный шкаф* (кратко – шкаф), *радиоэлектронный блок* (кратко – блок) и *радиоэлектронная ячейка* (кратко – ячейка). На практике наиболее широко пользуются понятием радиоэлектронный блок.

*Радиоэлектронный блок* – РЭС, представляющее собой совокупность радиоэлектронных ячеек, предназначенное для реализации функций передачи, приёма, преобразования информации и выполненное на основе несущей конструкции более высокого уровня, нежели используемых для ячеек.

*Радиоэлектронная ячейка* – РЭС, предназначенное для реализации функций передачи, приёма, преобразования сигналов, выполненное на основе несущей конструкции, используемой для размещения изделий электронной техники, электротехнических изделий, электрорадиоизделий и т.п.

Согласно ГОСТ под определение *РЭС* подпадают и электрорадиоизделия (полупроводниковые приборы, интегральные микросхемы, резисторы, конденсаторы и т.д.), которые представляют собой элементную базу конструкций РЭС. Но традиционно сложилось, что в конструировании под РЭС понимают изделия по функциональной сложности не ниже уровня РЭФУ, а по конструктивной сложности – не ниже уровня радиоэлектронной ячейки. Для элементов используют термины *изделия электронной техники* и *электрорадиоизделия*. В соответствии с ГОСТ 26632–85 термин РЭС представляет некий аналог термина РЭА, который по-прежнему широко используется в учебной и технической литературе. Поэтому в дальнейшей при изложении учебного материала нет существенного различия между терминами РЭС и РЭА.

### 1.3. Виды изделий и элементная база РЭС

#### 1.3.1. Общие сведения

Конструкция характеризует структуру и свойства изделия, под которым понимается любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии. Изделия различаются по видам:

*деталь* – изделие, представляющее неделимую часть конструкции и изготовленное из однородного по наименованию и марке материала или механически неразделённой композиции материалов;

*сборочная единица* – изделие, составные части которого подлежат соединению на предприятии-изготовителе с помощью сборочных операций;

*комплекс* – два изделия и более (состоящие, в свою очередь, из двух частей и более), не соединенные на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций;

*комплект* – два изделия и более, не соединенные на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющие общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера (например, комплект запасных частей, инструмента).

РЭС предназначены для передачи, приёма, хранения и преобразования информации, представленной в виде непрерывных или дискретных электромагнитных сигналов. Устройства, работающие с непрерывными электрическими (электромагнитными) сигналами, называют *аналоговыми*, а устройства, работающие с дискретными сигналами, *цифровыми*. Обычно в состав современных РЭС входят как аналоговые, так и цифровые устройства, в свою очередь включающие дискретные ЭРЭ – резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, полупроводниковые приборы (транзисторы, диоды, светодиоды и др.), а также компоненты в интегральном исполнении (ИМС, БИС, СБИС и элементы функциональной микроэлектроники). В состав элементной базы РЭС входят также элементы электромонтажа – соединители, печатные платы, провода, шлейфы и кабели из объёмного провода и др.

Микросхемы являются основной элементной базой современных РЭС из-за своей миниатюрности и высокой надёжности. Однако эксплуатационная надёжность аппаратуры зависит также от качества разработки конструкции, уровня технологического процесса изготовления и качества использованных в аппаратуре других комплектующих изделий – электрорадиоэлементов (резисторов, конденсаторов и др.), полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов и т.д.), электрических соединителей.

В условиях промышленного производства применение комплектующих изделий регламентируется ведомственными ограничительными перечнями. Не допускается, в частности, применение таких компонентов, как германиевые диоды и транзисторы (все они сняты с производства и запрещены к применению в новых разработках в России), устаревшие и снятые с производства типы интегральных микросхем, транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов, реле и т.п.

Ниже приводится краткая сводка информационных материалов по наиболее употребительным видам комплектующих изделий РЭС [1].

### 1.3.2. Резисторы постоянные

При выборе типа резисторов руководствуются рядом требований к их электрическим, конструктивным характеристикам и эксплуатационным показателям:

- номинальное значение сопротивления;
- номинальная мощность рассеяния;
- класс точности – допустимая погрешность основного параметра;
- коэффициент температурной зависимости сопротивления;
- уровень собственных шумов;
- допустимое падение напряжения на резисторе;
- массогабаритные показатели;
- возможность формовки выводов для использования в печатном монтаже, в том числе возможность монтажа автоматами;
- показатели устойчивости к климатическим воздействиям;
- показатели устойчивости к механическим воздействиям;
- показатели надёжности.

Массовым типом резисторов, применяемых в печатных узлах РЭС, являются постоянные металлодиэлектрические резисторы.

Шкалы номинальных значений основного параметра ЭРЭ, установленные государственным стандартом ГОСТ 28884-90, имеют обозначения: E6, E12, E24, E48, E96 и E192 (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Ряды номинальных значений (для резисторов)

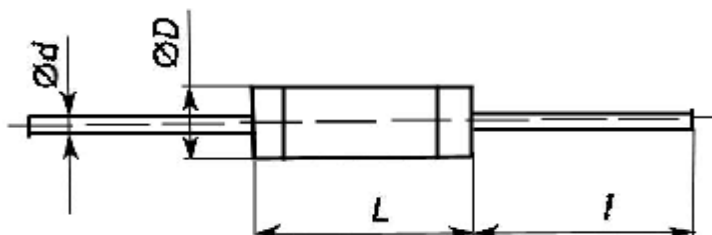
Обозначение ряда	Ряд							
E6	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8		
E12	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8		
	1,2	1,6	2,7	3,9	5,6	8,2		
E24	1,0	1,3	1,8	2,4	3,6	4,7	6,2	8,2
	1,1	1,5	2,0	2,7	3,9	5,1	6,8	9,1
	1,2	1,6	2,2	3,3	4,3	5,6	7,5	10,0
E48	100	133	178	237	316	422	568	750
	105	140	187	249	332	442	590	787
	110	147	196	261	348	464	619	825
	115	154	205	274	365	487	649	866
	121	162	215	287	383	511	681	909
	127	169	226	301	402	536	715	953
E96	100	133	178	237	316	422	562	750
	102	137	182	243	324	432	576	768
	105	140	187	249	332	442	590	787
	107	143	196	255	340	453	604	806
	110	147	196	261	348	464	619	825
	113	150	200	267	357	475	634	845
	115	154	205	274	365	487	649	866
	118	158	210	280	374	499	665	887
	121	162	215	287	383	511	681	909
	124	165	221	294	392	523	698	931
	127	169	226	301	402	536	715	953
	130	174	232	309	412	549	732	976

Наиболее массовым является ряд E24. Он характеризуется десятипроцентным приращением значения при переходе от номинала к номиналу и распространяется на элементы классов точности  $\pm 5\%$  и  $\pm 10\%$ . Ряды E48, E96 и E192 характеризуются соответственно приращениями 5, 2 и 1 % и распространяются на прецизионные электрорадиоэлементы. Ряды E6 и E12 распространяются на переменные резисторы. Рассмотренные ряды номинальных значений распространяются также на конденсаторы и катушки индуктивности.

Номинальные значения параметров (сопротивлений) образуются из чисел табл. 1.2 путём умножения или деления их на 10 или на числа, кратные 10. Производные от основной единицы сопротивления – ома в инженерной практике называются килоомами, мегаомами, гигаомами. При указании номинала сопротивления резистора в конструкторской документации и в технической литературе используются обозначения: Ом, кОм, МОм, ГОм.

При выполнении курсовых проектов (работ) и для использования в дипломном проектировании могут быть рекомендованы следующие типы резисторов.

1. Резисторы С2-23 ОЖО.467.081 ТУ (рис.1.1).



Номинальные значения сопротивлений от 1 Ом до 10 МОм. Номинальная мощность рассеяния от 0,062 до 2,0 Вт (шесть типоразмеров по мощности).

Рис.1.1. Металлодиэлектрический резистор типа С2-23

Шкала номинальных значений по ГОСТ 28884-90:

Е96 – для классов точности  $\pm 1, \pm 2 \%$ ; Е24 – для классов точности  $\pm 5, \pm 10 \%$ . В табл. 1.3 приведены обозначения типоразмеров и сведения о габаритных размерах резисторов С2-23.

Таблица 1.3

Основные параметры резисторов С2-23

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$ , Вт	$L$ , мм	$D$ , мм	$d$ , мм	$l$ , мм
С2-23-0,062	0,062	4,6	1,6	0,5	20
С2-23-0,125	0,125	6,0	2,0	0,5	20
С2-23-0,25	0,25	7,0	3,0	0,6	20
С2-23-0,5	0,5	10,8	4,2	0,8	25
С2-23-1	1,0	13,0	6,6	0,8	25
С2-23-2	2,0	18,5	8,8	1	25

2. Резисторы С2-33Н ОЖО.467.173 ТУ.

Выпускаются шести типоразмеров по величине номинальной мощности рассеяния – от 0,125 до 2 Вт, в вариантах исполнения для ручного и автоматического монтажа.

Номинальные значения сопротивлений от 1,0 Ом до 22 МОм.

Классы точности  $\pm 1, \pm 2, \pm 5, \pm 10 \%$ .

Шкала номинальных значений для классов точности  $\pm 1, \pm 2 \%$  – Е96, для классов точности  $\pm 5 \%, \pm 10 \%$  – Е24 (ГОСТ 28884-90).

3. Прецизионные резисторы С2-29В ОЖО.467.130 ТУ.

Выпускаются в шести типоразмерах по величине номинальной мощности рассеяния – от 0,062 до 2 Вт.

Номинальные значения сопротивлений от 1 Ом до 20 МОм.

Классы точности  $\pm 0,05$ ,  $\pm 0,1$ ,  $\pm 0,25$ ,  $\pm 0,5$ ,  $\pm 1$  %.

Шкала номинальных значений – E192 (ГОСТ 28884-90).

Показателем температурной зависимости сопротивления резистора является температурный коэффициент сопротивления (ТКС) – относительное изменение сопротивления при изменении температуры на один градус по Цельсию (Кельвину).

В табл. 1.4 приведена классификация резисторов перечисленных типов по величине температурного коэффициента сопротивления.

Таблица 1.4

Классификация резисторов по величине ТКС

Тип	Группа ТКС	ТКС, $\times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	Диапазон температур, $^\circ\text{C}$	Диапазон номинальных значений	Класс точности, %
С2-23	В	$\pm 300$	$-60...+20$	1 Ом...9,1 МОм	$\pm 2, \pm 5, \pm 10$
	Г	$\pm 500$	$-60...+20$	1 Ом...1 МОм	$\pm 2, \pm 5, \pm 10$
	Д	$\pm 800$	$-60...+20$	1 Ом...10 МОм	$\pm 2, \pm 5, \pm 10$
	Е	$\pm 1200$	$-60...+20$	1 Ом...10 МОм	$\pm 5, \pm 10$
	Е	$\pm 150$	–	10 Ом...1 МОм	$\pm 0,5, \pm 1, \pm 2$
	Ж	$\pm 75$	–	33,2 Ом...15,8 кОм	$\pm 0,5, \pm 1, \pm 2$
С2-29В	А	$\pm 75$	$-60...+20$	10 Ом...10 МОм	Все классы: 0,05, 0,1 0,25, 0,5 1
	Б	$\pm 150$	$-60...+20$	1 Ом...20 МОм	
	В	$\pm 300$	–	1 Ом...20 МОм	
	Д	$\pm 5$	$+20...+70$	10 кОм...100 кОм	
	С	$\pm 50$	$-60...+20$	101 Ом...100 кОм	
С2-33Н	Б	$\pm 100$	$-60...+20$	1 кОм...9,76 кОм	$\pm 0,5, \pm 1, \pm 2$
	В	$\pm 300$	–	10 Ом...240 кОм	$\pm 1, \pm 2, \pm 5$
	Г	$\pm 500$	–	1 Ом...1 МОм	$\pm 10$
	Д	$\pm 500$	–	1 Ом...1 МОм	$\pm 2, \pm 5, \pm 10$
	Ж	$\pm 1500$	–	10 Ом...22 МОм	$\pm 5, \pm 10$

Уровень собственных шумов характеризуется значением флуктуационной составляющей падения напряжения на резисторе (в микровольтах на один вольт падения напряжения).

Предельно допустимые эксплуатационные характеристики перечисленных типов резисторов практически одинаковы:

диапазон температур..... $-60 +155$   $^\circ\text{C}$   
 относительная влажность воздуха при  $+35$   $^\circ\text{C}$ ..... 98 %  
 пониженное атмосферное давление..... $1,3 \cdot 10^{-4}$  Па  
 повышенное атмосферное давление..... $2,97 \cdot 10^5$  Па



В табл. 1.5 приведена классификация резисторов рассматриваемых типов в зависимости от группы уровня собственных шумов.

Предельные рабочие напряжения резисторов представлены в табл. 1.6.

Таблица 1.5

Классификация резисторов по уровню собственных шумов

Тип резистора	Группа по уровню собственного шума	Пределы номинальных значений сопротивлений	Уровень собственного шума, мкВ/В не более
С2-23	А	До 10 кОм	1
	А	Свыше 10 кОм	1
	Б		5
	Без обозначения		Не нормирован
С2-29В	Без обозначения	1 Ом...10 кОм	1
		10 кОм...499 кОм	0,5
			1
		499 кОм...10 МОм	1
			5
		Свыше 10 МОм	5
С2-33Н	А	0,1 Ом...10 кОм	1
		10 кОм...10 МОм	1
	Без обозначения	10 Ом...22 МОм	5

Таблица 1.6

Предельные рабочие напряжения резисторов

Тип	Предельное напряжение $U_{пред}$ , В	$P_{ном}$ , Вт					
		0,062	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0
С2-23	Постоянное, переменное	100	200	250	350	500	750
	Импульсное	150	350	450	750	1000	1200
С2-29В	Постоянное, переменное	150	200	350	500	750	750
	Импульсное	300	400	750	1000	1200	1200
С2-33Н	Постоянное, переменное	–	200	250	350	500	750
	Импульсное	–	400	450	750	1000	1200

Допустимые параметры механических воздействий для рассмотренных выше типов резисторов следующие:

максимальная частота синусоидальной вибрации.....5000 Гц

пиковое ускорение одиночного удара.....10 000 м/с<sup>2</sup> (1000 g)

пиковое ускорение многократного удара.....1500 м/с<sup>2</sup> (150 g)  
 максимальная резонансная частота.....5000 Гц

Показатели надёжности рассматриваемых здесь типов резисторов сведены в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Показатели надёжности резисторов

Тип резистора	C2-23	C2-29B	C2-33H
Интенсивность отказов, 1/ч	$0,189 \cdot 10^{-6}$	$0,117 \cdot 10^{-6}$	$0,189 \cdot 10^{-6}$
Минимальная наработка, ч	50 000	25 000	30 000
Срок сохраняемости, лет	25	25	25 ( $R \geq 1 \text{ Ом}$ )

На примере записи в конструкторской документации покажем, в каком порядке указывается информация о резисторе:

Резистор C2-33 -0,25 -22 кОм ±5% A – B – B – A ОЖО.467.173 ТУ

Обозначение документа на применение  
Для автоматического монтажа  
Всеклиматическое исполнение  
Группа по ТКС  
Класс по уровню шумов  
Класс по точности  
Номинальное значение сопротивления  
Номинальная мощность рассеяния  
Тип резистора

### 1.3.3. Резисторы переменные

Резисторы с регулируемой величиной сопротивления называются *переменными резисторами*.

По видам осуществляемых регулировок переменные резисторы подразделяются на регулировочные и подстроенные.

*Регулировочные* переменные резисторы предназначены для осуществления оперативных регулировок в процессе эксплуатации РЭС.

*Подстроечные* переменные резисторы предназначены для осуществления регулировок эпизодически, при наладке узлов и блоков РЭС.

В табл. 1.8 приведена сводка данных для некоторых типов переменных резисторов, предназначенных для печатного монтажа.

Выбор типа переменного резистора должен выполняться исходя из условий поставленной задачи с учётом всех приведённых параметров в табл. 1.8 и ряда дополнительных показателей.

## Переменные резисторы для печатного монтажа

Параметры	Тип резистора			
	СПЗ-19Б	РП1-84	РП1-61А	РП1-63ВМ
<i>Конструктивные характеристики</i>				
Габариты, мм	7,5x6,5x9	10x6,3x10	10x4,5x12,2	10x4x10,6
Шаг выводов, мм	2,5	2,5	2,5	5
Масса, г	0,8	3	1	1,5
Износоустойчивость, число циклов	500	15000	200	500
<i>Электрические характеристики</i>				
Диапазон номинальных значений, Ом	10... 1·10 <sup>6</sup>	470...4,7·10 <sup>6</sup>	100...6,8·10 <sup>6</sup>	47... 1·10 <sup>6</sup>
Класс точности, %	10...20	20... 30	20...30	10...20
Номинальная мощность рассеяния, Вт	0,5	0,025	0,5	0,125
Температура при номинальной мощности, °С	70	55	70	40
ТКС (по модулю), (1/К) x 10 <sup>-6</sup>	250...500	1000	100...250	1000...1500
Уровень собственных шумов, мкВ/В	20	5...30	20	20
Сопротивление изоляции, МОм	1000	1000	–	100
Начальный скачок, %	15	10	15	10
<i>Эксплуатационные характеристики</i>				
Диапазон рабочих температур, °С	–60...+125	–60...+70		–60...+125
Коэффициент снижения мощности при максимальной температуре	0,1	0,2	–	0,4
Относительная влажность при 25 °С, %	98			
Предельное напряжение постоянного и переменного тока, В	150	50	250	150
Предельное напряжение импульсное, В	210	–	350	150
Максимальная частота синусоидальной вибрации, Гц	5000	80	80	80

Параметры	Тип резистора			
	СПЗ-19Б	РП1-84	РП1-61А	РП1-63ВМ
Однократный удар: пиковое ускорение, м/с <sup>2</sup> длительность импульса, мс	10000 0,1. ..2,0	– –	– –	– –
Многokrатные удары: пиковое ускорение, м/с <sup>2</sup> длительность импульса 1...5 мс	1500	150	150	150
Максимальная резонансная частота, Гц	100	100	100	80
<i>Показатели надёжности</i>				
Интенсивность отказов, 1/ч	0,072·10 <sup>-6</sup>	0,026·10 <sup>-6</sup>	0,026·10 <sup>-6</sup>	0,026·10 <sup>-6</sup>
Минимальная наработка, ч	20 000	20 000	20 000	15 000
Срок сохраняемости, лет	25	12	15	10

*Примечание.* Ряд номинальных значений всех перечисленных типов переменных резисторов – Е6 по ГОСТ 28884-90.

Одним из важных свойств переменного резистора является его функциональная характеристика – закон изменения сопротивления между выводом, соединенным с подвижной контактной щеткой, и одним из крайних выводов резистора от угла поворота или продольного перемещения подвижной системы.

Регулировочные резисторы выпускаются с тремя видами функциональной характеристики:

- «А» – с линейной зависимостью сопротивления от угла поворота;
- «Б» – с зависимостью, близкой к логарифмической;
- «В» – с зависимостью в виде показательной функции.

Переменные резисторы с функциональной характеристикой «В» применяются в регуляторах громкости радиовещательных приемников и звуковоспроизводящей аппаратуры, чтобы скомпенсировать логарифмическую динамическую характеристику человеческого слуха и обеспечить возможность изменения громкости звучания пропорционально углу поворота или продольному перемещению подвижной системы регулятора, особенно при малых уровнях громкости.

Переменные резисторы с функциональной характеристикой «Б» применяются в узлах управления формой частотной характеристики (регулируемого тембра) звуковоспроизводящей аппаратуры.

К подстроечным резисторам требования нелинейной функциональной характеристики не предъявляются, и они выпускаются с характеристикой «А».

Следует иметь в виду, что наличие подстроечных переменных резисторов в узлах РЭС всегда нежелательно. Наличие их в печатных узлах РЭС приводит к увеличению габаритных размеров, предполагает необходимость обеспечения доступа к работающему узлу для выполнения подстройки, что часто усложняет конструкцию узлов и блоков и ухудшает условия их защиты от воздействия факторов внешней среды.

С точки зрения электрических характеристик подстроечные резисторы являются источниками дополнительного внутреннего шума, значительно превышающего внутренние шумы постоянных резисторов.

С точки зрения надёжности подстроечные резисторы являются потенциальным источником отказов, связанных с превышением ресурса износоустойчивости, составляющего у разных типов всего от 100 до 500 полных циклов регулировки (поворотов подвижной системы). Поэтому следует проектировать высокостабильные аналоговые узлы, сохраняющие свои характеристики в течение всего срока их работы без подстройки.

Пример записи в конструкторской документации:

*Резистор РП1-81-100 кОм ± 20 % АШПК.434160.017 ТУ.*

#### 1.3.4. Конденсаторы постоянной ёмкости

При выборе типа и типоразмера конденсаторов набор требований, сформулированных по отношению к резисторам, несколько изменяется только в части электрических характеристик. Не повторяя всего набора, перечислим ряд показателей, специфических именно для конденсаторов:

- номинальное рабочее напряжение (постоянного, переменного тока или импульсного);
- частотный диапазон, в котором работает конденсатор;
- тангенс угла диэлектрических потерь;
- зависимость величины ёмкости от рабочего напряжения.

Большое разнообразие требований по номинальным значениям ёмкости – от единиц пикофард до тысяч микрофард, по рабочим напряжениям – от единиц до тысяч вольт, по классу точности, потерям, температурному коэффициенту ёмкости (ТКЕ) – все это определяет разнообразие типов и обилие типоразмеров конденсаторов.

Приведём выдержки из справочных материалов по некоторым типам конденсаторов, предназначенных для использования в печатных платах РЭС.

##### **1. Конденсаторы с керамическим диэлектриком К10-17а (рис. 1.2, а)**

Предназначены для применения во всех видах радиоаппаратуры в цепях постоянного и переменного тока в широком диапазоне частот.

Выпускаются в изолированном всеклиматическом исполнении (залиты обволакивающим компаундом) в трёх типоразмерах (табл. 1.9).

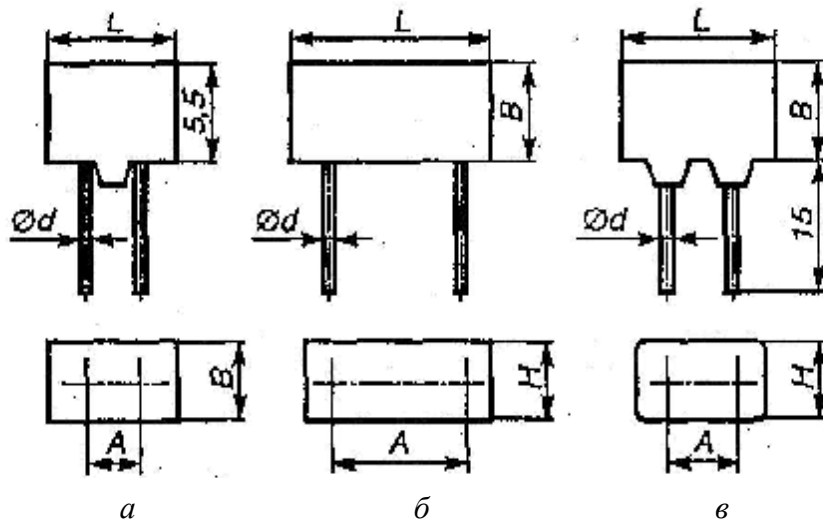


Рис. 1.2. Конденсаторы с керамическим диэлектриком:  
 а – типа К10-17а; б – типа К10-47а; в – типа К10-47б

Таблица 1.9

Типоразмеры конденсаторов К10-17а

Значения ёмкости	L, мм	B, мм	A, мм	d, мм
2,2... 2000 пФ(гр. П33 и др.) 6,8 нФ... 0,47 мкФ (гр. Н90)	6,8	4,6	2,5	0,6
2,2 нФ (гр. П33) ... 1,5 мкФ (гр. Н90)	8,4	6,7	5,0	0,6
6,2 нФ (гр. П33)... 0,47 мкФ (гр. Н90)	12	8,6	7,5	0,6

Номинальные значения ёмкости от 2,2 пФ до 1,5 мкФ (шкала E24).

Группы по ТКЕ: П33, М47, М750, М1500, Н50 и Н90.

Классы точности: (+80...–20) % для группы ТКЕ Н90; ±5, ±10, ±20 % для остальных групп.

Номинальные рабочие напряжения от 25 до 160 В.

Пример записи в конструкторской документации:

*Конденсатор К10-17а – М47 – 430 пФ ± 10 % – В – ОЖО. 460.107 ТУ.*

## 2. Керамические конденсаторы К10-47а, К10-47б (рис. 1.2, б, в)

Предназначены для применения в цепях постоянного, переменного и пульсирующего тока в широком диапазоне частот.

Номинальные значения ёмкости от 10 нФ до 2,2 мкФ.

Группы по ТКЕ: Н30, Н50, Н90.

Классы точности: (+80...–20) % для группы Н90; ±10, ±20 % для остальных групп ТКЕ.

Номинальные рабочие напряжения 50, 100 и 250 В. Следует иметь в виду, что в качестве диэлектрика в конденсаторах данного типа использована сегнетокерамика, вследствие чего номинальное значение ёмкости реализуется только при рабочих напряжениях, близких к номинальным.

В табл. 1.10 приведены конструктивные данные конденсаторов К10-47, в исполнении «а» и «б» температурной группы Н30: «а» – в пластмассовом корпусе, «б» – залиты обволакивающим компаундом.

Таблица 1.10

Конструктивные данные конденсаторов К10-47

Значения ёмкости	$U_{\text{ном}}$ , В	$L$ , мм	$H$ , мм	$B$ , мм	$A$ , мм	$d$ , мм
<i>Исполнение «а», группа ТКЕ Н30</i>						
10... 33 нФ	100	7,5	5,3	5	5	0,6
47; 68 нФ		9	5,3	7,1	5	0,6
0,1; 0,15 мкФ		12	5,3	9,5	7,5	0,8
0,22; 0,33 мкФ		14	5,3	11	10	0,8
0,47; 0,68 мкФ	100	16	5,3	13,5	12,5	0,8
10; 15 нФ	250	9	5,3	7,1	5	0,6
22; 33; 47 нФ		12	5,3	9,5	7,5	0,8
0,068 мкФ		14	5,3	11	10	0,8
0,1 мкФ		16	5,3	13,5	12,5	0,8
<i>Исполнение «б», группа ТКЕ Н30</i>						
10...33 нФ	100	7,5	5,3	5	5	0,6
47; 68 нФ	100	9	5,3	7,1	5	0,6
10; 15 нФ	250	9	5,3	7,1	5	0,6

Пример записи в конструкторской документации:

*Конденсатор К10-47а – 100 В – 0,22 мкФ ± 20 % Н30 ОЖО.460.174 ТУ.*

Сводка данных по электрическим параметрам, эксплуатационным показателям, показателям надёжности рассматриваемых здесь типов керамических конденсаторов приведена в табл. 1.11.

Таблица 1.11

Параметры керамических конденсаторов

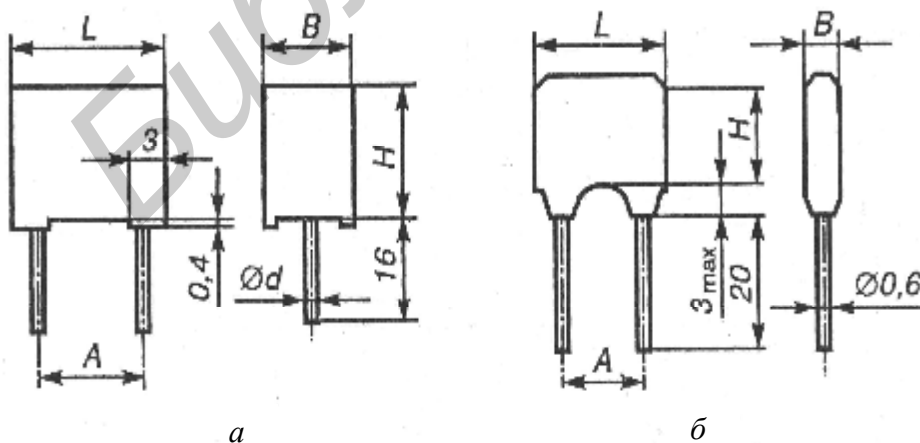
Параметры	Тип конденсатора		
	К10-17а	К10-47а	К15-20б
<i>Электрические параметры</i>			
Номинальное напряжение, В	25...160	50, 100, 250	1600...4000
Допуск, %	Н90(+80...-20) Н50 (+50...-20) Остальные группы ±5, ±10, ±20	Н30 ±20 Н90 (+80...-20)	Н50 (+50... -20)
Тангенс угла потерь	0,0015 при $C > 50$ пФ	0,0015 при $C > 50$ пФ	0,035
Сопротивление изоляции, МОм	10 000	4000	10 000

Параметры	Тип конденсатора		
	К10-17а	К10-47а	К15-20б
<i>Устойчивость к воздействиям факторов окружающей среды</i>			
Температура, °С	-60...+125	-60...+125	-60...+85
Атмосферное давление: пониженное повышенное	1,3·10 <sup>-4</sup> 2,97·10 <sup>5</sup>	1,3·10 <sup>-4</sup> 2,97·10 <sup>5</sup>	1,3·10 <sup>-4</sup> 2,97·10 <sup>5</sup>
Относительная влажность при 25°С	98 %	98 %	80 %
Соляной туман	Устойчив	Устойчив в исполнении «б»	Устойчив
Иней, роса	Устойчив	Устойчив в исполнении «б»	–
Плесневые грибы	Устойчив	Устойчив в исполнении «б»	–
Синусоидальная вибрация, Гц; Ускорение, м/с <sup>2</sup>	– –	80 (5000)* 50 (400)*	50... 10 000 400
Акустический шум в диапазоне 50... 10 000 Гц, дБ	–	170	170
Однократный удар, м/с <sup>2</sup>	–	5000(15 000)*	15 000
Многократные удары, м/с <sup>2</sup>	–	400(1500)*	1500
Линейное ускорение, м/с <sup>2</sup>	–	5000*	5000
<i>Показатели надёжности</i>			
Интенсивность отказов, 1/ч	0,099·10 <sup>-6</sup>	0,117·10 <sup>-6</sup>	0,117·10 <sup>-6</sup>
Минимальная наработка, ч	25 000	30 000	2000
Срок сохраняемости, лет	25	20... 25	20

\* При креплении конденсатора за корпус.

### 3. Конденсаторы металлоплёночные полиэтилентерефталатные (ЛАВ-САН) К73-24 (рис. 1.3)

Предназначены для работы в качестве встроенных элементов внутреннего монтажа аппаратуры в цепях постоянного, переменного и пульсирующего тока.



Конденсаторы изготавливаются в трёх вариантах: «а», «б» и «в».

Конденсаторы варианта «а» – уплотнённые (рис. 1.3, а), варианта «б» – незащищённые, варианта «в» – защищённые компаундом (рис. 1.3, б).

Рис. 1.3. Конденсаторы металлоплёночные полиэтилентерефталатные: а – типа К73-24; б – типа К73-24в



В табл. 1.12 приведены сведения о номенклатуре номинальных значений ёмкости, рабочих напряжений и габаритных размеров конденсаторов К73-24в.

Таблица 1.12

Параметры конденсаторов К73-24в

$C_{\text{НОМ}}$ , мкФ	$U_{\text{НОМ}} = 100 \text{ В}$				$U_{\text{НОМ}} = 250 \text{ В}$			
	$L$ , мм	$H$ , мм	$B$ , мм	$A$ , мм	$L$ , мм	$H$ , мм	$B$ , мм	$A$ , мм
0,001	11	9	4,5	7,5	11	9	4,5	7,5
0,0015								
0,0022								
0,0033								
0,0047								
0,0068								
0,0082								
0,01								
0,012								
0,015								
0,022								
0,027								
0,033	13	10,5			13	11,5	6	10
0,039								
0,047								
0,056								
0,068								
0,082								
0,1								
0,12								
0,15								
0,18								
0,22								
0,27								
0,33	13,5	11,5	6,0	10	19,5	16	6,1	15
0,39								
0,47								
0,56								
0,68								
0,82								
1,0	19,5	16	5,6	15	27	19	11,2	22,5
0,68								
0,82								
1,0	19,5	16	5,6	15	27	19	8,8	22,5
0,68								
0,82								
1,0	19,5	16	6,7	15	27	19	10,5	22,5
0,68								
0,82								

Пример записи в конструкторской документации:

*Конденсатор К73-24в – 700 В – 0,1 мкФ – ±10 % АДПК. 673633.010 ТУ.*

#### 4. Конденсаторы металлоплёночные полиэтилентерефталатные К73-39

Заменяют: металлоплёночные конденсаторы К73-17, К73-30, К73-34, керамические конденсаторы КМЗ «б» – КМ6 «б», К10-17 «б», К10-47 «а» групп Н30, Н50, Н90, превосходя их по стабильности ёмкости.

Основные технические данные металлоплёночных конденсаторов двух рассматриваемых здесь типов приведены в табл. 1.13.

Таблица 1.13

Технические данные металлоплёночных конденсаторов

Параметры	Тип конденсатора	
	K73-24В	K73-39
<i>Электрические параметры</i>		
Номинальная ёмкость	0,001... 6,8 мкФ	0,001... 1,0 мкФ
Номинальное напряжение (в интервале температур от –60 до +85 °С), В	100, 250	63, 100, 250, 400, 630
Класс точности	±5; ±10; ±20	±5; ±10; ±20
Тангенс угла потерь при $f = 1$ кГц	≤ 0,012	≤ 0,012
Сопротивление изоляции для $C_{ном} \leq 0,033$ мкФ, МОм, не менее	3000	3000
Сопротивление изоляции между соединенными выводами и корпусом, не менее МОм,	10 000	–
Постоянная времени для $C_{ном} \geq 0,033$ мкФ, МОм·мкФ	≥ 1000	≥ 1000
<i>Эксплуатационные характеристики</i>		
Интервал рабочих температур	–60...+100°С	–60... +100 °С
Относительная влажность при 25 °С	98%	98 %
Пониженное атмосферное давление, Па	$6,66 \cdot 10^2$	–
Синусоидальная вибрация: диапазон частот, Гц амплитуда ускорения, м/с <sup>2</sup>	1...80 50	– –
Пиковое ускорение многократного удара, м/с <sup>2</sup>	150	–
<i>Показатели надёжности</i>		
Интенсивность отказов, 1/ч	$0,3 \cdot 10^{-6}$	$0,117 \cdot 10^{-6}$
Минимальная наработка, ч	15 000	15 000
Срок сохраняемости, лет	15	20

Пример записи в конструкторской документации:

*Конденсатор K73-39 – 100 В – 0,1 мкФ ± 10 % РАЯЦ. 673633.000 ТУ.*

### 5. Оксидно-электролитические конденсаторы K50-35 (рис. 1.4, а)

Предназначены для применения в цепях постоянного и пульсирующего тока для фильтрации помех. Выпускаются в цилиндрическом алюминиевом корпусе (исполнение «И» – в полихлорвиниловой оболочке). Диаметр корпуса 6,3 и 8 мм (диаметр выводов 0,6 мм, шаг 2,5 мм); 10, 14 и 16 мм (диаметр выводов 0,8 мм, шаг 5 мм); 18 и 21 мм (диаметр выводов 0,8 мм, шаг 7,5 мм).

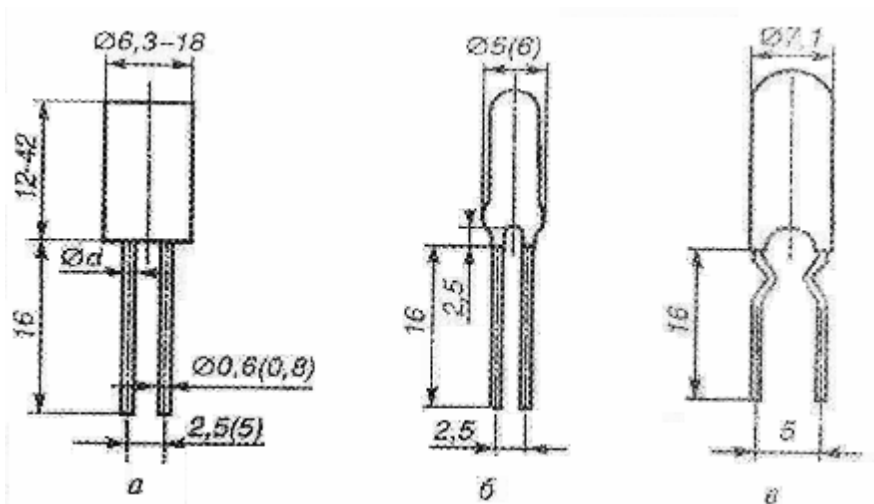


Рис 1.4. Конденсаторы:

*a* – оксидно-электролитические типа К50-35;  
*б, в* – оксидно-полупроводниковые типа К53-34

Номинальные рабочие напряжения 6,3 ...315 В.

Номинальные значения ёмкости 1,0 ... 4700 мкФ.

Пример записи в конструкторской документации:

*Конденсатор К50-35 – 25 В -47 мкФ – И-В-А ОЖО.464.214 ТУ.*

#### 6. Конденсаторы оксидно-полупроводниковые К53-34 (рис. 1.4, б, в)

Конденсаторы неполярные. Предназначены для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего тока.

Выпускаются в изолированном всеклиматическом исполнении в двух вариантах: К53-34-1 (см. рис. 1.4, б) – 2 типоразмера (Ø5 и 6 мм) и К53-34-2 (см. рис. 1.4, в) – 3 типоразмера (Ø 5, 6 и 7,1 мм).

Шаг расположения выводов 2,5 и 5 мм (рис. 1.4, б, в).

Номинальное рабочее напряжение от 1,6 до 50 В.

Номинальные значения ёмкости от 6,8 до 100 мкФ, шкала Е6.

Пример записи в конструкторской документации:

*Конденсатор К53-34-1 – 6,3 В – 10 мкФ ± 20 % – В ОЖО.464.238 ТУ.*

#### 7. Конденсаторы оксидно-электролитические неполярные К50-51

Предназначены для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего тока и в импульсных режимах.

Выпускаются в цилиндрическом алюминиевом корпусе, одного типоразмера: диаметр корпуса 6 мм, высота 11 мм, диаметр выводов 0,6 мм, шаг 2,5 мм.

Номинальные рабочие напряжения 6,3; 16, 25 и 50 В.

Номинальные значения ёмкости 2,2; 4,7; 10; 22 и 47 мкФ.

Пример записи в конструкторской документации:

*Конденсатор К50-51 – 25В – 47мкФ – И-В:А АДПК.673541.000 ТУ.*

## 8. Конденсаторы оксидно-полупроводниковые ниобиевые, полярные К53-21

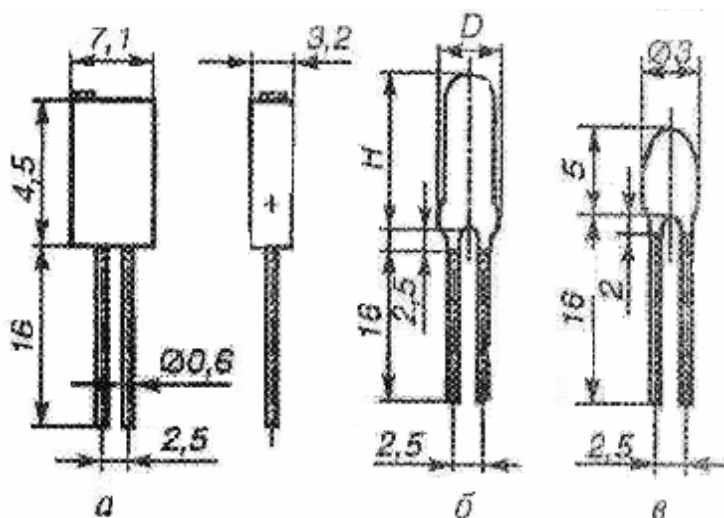


Рис. 1.5. Конденсаторы оксидно-полупроводниковые ниобиевые, полярные: а – типа К53-21; б, в – типа К53-30

Предназначены для работы в цепях постоянного и пульсирующего тока и в импульсных режимах. Выпускаются в «уплотненном» исполнении в пластмассовом корпусе одного типоразмера (рис. 1.5).

Номинальные рабочие напряжения 6,3; 10; 16; 20 и 32 В.

Номинальные значения ёмкости 0,68 ... 4,7 мкФ, шкала Е6. Класс точности  $\pm 20\%$ .

Пример записи в конструкторской документации:

*Конденсатор К53-21 – 20 В – 47 мкФ  $\pm 20\%$  – А ОЖО.464.157 ТУ.*

## 9. Конденсаторы оксидно-полупроводниковые ниобиевые, полярные К53-30

Выпускаются в изолированном всеклиматическом исполнении и в исполнении УХЛ, в двух модификациях (рис. 1.5, б, в).

Номинальные рабочие напряжения 1,6... 32 В.

Номинальные значения ёмкости 1,0... 15 мкФ.

Обозначение документа на применение: ОЖО.464.279 ТУ для модификации 1 (см. рис. 1.5, б) ОЖО. 464.225 ТУ – для модификации 2 (см. рис. 1.5, в).

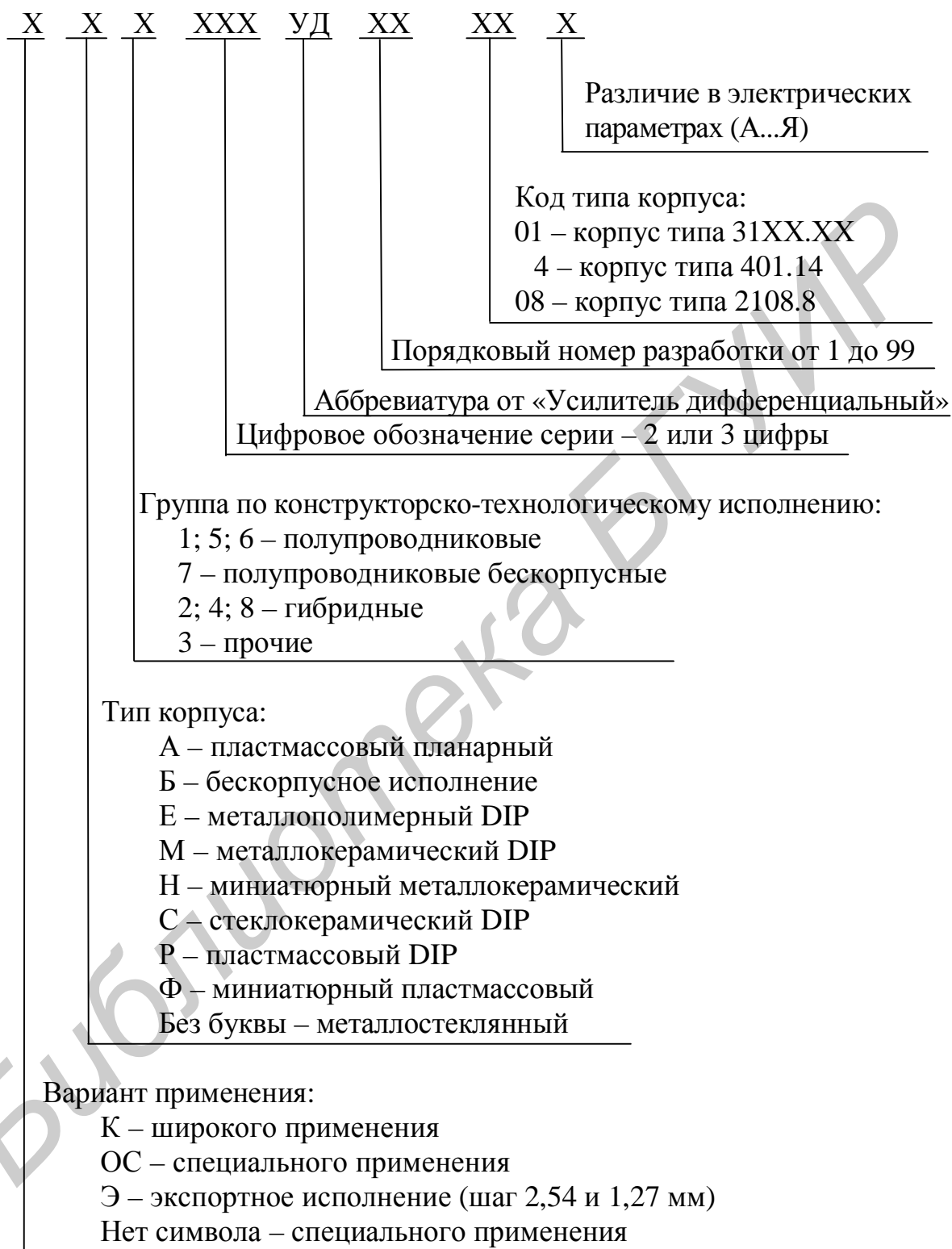
Пример записи в конструкторской документации:

*Конденсатор К53-30-1 – 1,6 В – 47 мкФ  $\pm 20\%$  – В – А ОЖО.464.279 ТУ.*

### 1.3.5. Интегральные микросхемы

Выбор серии и конкретных типов микросхем основывается на знании их электрических параметров и эксплуатационных показателей. Широко используются ИМС операционных усилителей. Операционный усилитель (ОУ), выполненный в виде интегральной микросхемы, используется в технике записи и воспроизведения звука, в технике телекоммуникаций, радиопередачи и радиоприема, в телевидении – для усиления, сравнения, фильтрации, генерирования сигналов и т.п. По электрическим характеристикам ОУ подразделяются на следующие классы: ОУ общего применения; высоковольтные и мощные ОУ; микромощные ОУ; быстродействующие широкополосные ОУ; прецизионные (высокоточные) ОУ; многоканальные ОУ.

Для обозначения микросхем операционных усилителей, производимых в странах СНГ, принята следующая кодировка.



Примеры обозначения: 140УД1А; КР140УД608; КФ1053УД3 и т.п.

В табл. 1.14 приводится сводка необходимых конструктору сведений по ОУ широко распространенной серии 140.

## Операционные усилители серии 140

Тип ОУ	Классификационный тип	Тип корпуса	Технические условия
140УД1	Общего применения	301.12-1	БК0.347.004ТУ
КР140УД1	Общего применения	201.14-1	БК0.348.454 ТУ
140УД5	Быстродействующий	301.12-1	БК0.347.004 ТУ3
КР140УД5	Быстродействующий	201.14-1	БК0.348.239 ТУ
140УД6	Общего применения	301.8-2	БК0.347.004 ТУ4
КР140УД6	Общего применения	201.14-1	ТУ 11-БК0.348.095-03ТУ-85
140УД7	Общего применения	301.8-2	БК0.347.004 ТУ5
КР140УД7	Общего применения	201.14-1	ТУ 11-БК0.348.095-04ТУ-85
140УД8	Общего применения	301.8-1	БК0.347.027 ТУ
КР140УД8	Общего применения	2101.8-1	БК0.348.150 ТУ
140УД9	Общего применения	301.12-1	БК0.347.004 ТУ9
КР140УД9	Общего применения	2101.8-1	БК0.348.488 ТУ
140УД11	Быстродействующий	301.8-2	БК0.347.004ТУ15
140УД12	Микромощный	301.8-2	БК0.347.004 ТУ10
КР140УД12	Микромощный	201.14-1	ТУ 11-БК0.348.095-04ТУ-85
140УД13	Прецизионный	301.8-2	БК0.347.004 ТУ12
КР140УД14	Микромощный	201.14-1	БК0.348.304 ТУ
140УД14	Микромощный	301.8-2	БК0.347.004 ТУ11
К140УД16	Общего применения	301.8-2	БК0.348.669 ТУ
140УД17	Прецизионный	301.8-2	БК0.347.004 ТУ17
КР140УД18	Общего применения	2101.8-1	БК0.348.095-11 ТУ
140УД20	Двухканальный	201.14-10	БК0.347.004 ТУ14
К140УД22	Общего применения	301.8-2	БК0.348.095-13 ТУ

По условиям эксплуатации в рамках серии 140 выпускаются конструктивные исполнения микросхем, предназначенные для применения в аппаратуре как общепромышленного, так и специального назначения. Соответствующие разновидности микросхем выполняются в пластмассовых или металлокерамических *DIP*-корпусах или в круглых металлостеклянных корпусах со штыревыми выводами.

В табл. 1.15 приведена сводка эксплуатационных показателей интегральных схем ОУ данной серии.

## Эксплуатационные показатели ОУ серии 140

Показатели	Серия, модификация				
	140	Н140	К140	КР140	КФ140
<i>Устойчивость к внешним воздействиям</i>					
Температурный диапазон, °С	-60...+125	-60...+85	-10...+70	-10...+70	-10...+70
Атмосферное давление, Па: пониженное повышенное	$6,67 \cdot 10^2$ $2,97 \cdot 10^5$	$6,67 \cdot 10^2$ $2,97 \cdot 10^5$	$26,6 \cdot 10^4$ $2,97 \cdot 10^5$	$26,6 \cdot 10^4$ $2,97 \cdot 10^5$	$26,6 \cdot 10^4$ $2,97 \cdot 10^5$
Синусоидальная вибрация: диапазон частот, Гц ускорение, м/с <sup>2</sup>	1...5000 400	1...5000 400	1...2000 200	1...2000 200	1...500 100
Однократный удар: пиковое ускорение, м/с <sup>2</sup> ; длительность импульса, мс	15 000 (0,1...2,0)	15 000 (0,1...2,0)	1500 (0,1...2,0)	1500 (0,1...2,0)	1500 (0,1...2,0)
Многократные удары: пиковое ускорение, м/с <sup>2</sup> ; длительность импульса, мс	1500 1...5	1500 1...5	750...1500 1...6	1500 1...5	750 1...6
Линейное ускорение, м/с <sup>2</sup>	5000	5000	5000	5000	500
Акустический шум: диапазон частот, Гц; интенсивность, дБ	50...1000 0 170	—	—	—	—
Относительная влажность при 35 °С	—	—	98 %	98 %	98 %
Иней и роса	Устойчив	Устойчив	—	—	—
Соляной туман	Устойчив	Устойчив	—	—	—
Плесневые грибы	Устойчив	Устойчив	—	—	—
<i>Показатели надёжности</i>					
Интенсивность отказов, 1/ч	$0,033 \cdot 10^{-6}$	$0,066 \cdot 10^{-6}$	$0,182 \cdot 10^{-6}$	$0,265 \cdot 10^{-6}$	$0,265 \cdot 10^{-6}$
Срок сохраняемости, лет	25	20	10	12	10

В современных РЭС и ЭВС используются различные виды интегральных логических микросхем: серии быстродействующих микросхем на эмиттерно-связанной логике (ЭСЛ-серии 100, 500 и др.), серии микросхем транзистор-транзисторной логики (ТТЛ-серии 133, К113, К155, 1533, К1533, К555 и др.),

серии микросхем на комплементарных МДП-структурах (КМДП-серии К176, 564, К561), серии микросхем памяти К537, К556, К565, К573 и другие, микропроцессорные комплекты и однокристальные микроЭВМ – серии К580, К1801, К1810, К1816 и другие, серии микросхем аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей К572, К1110 и т.д.

Среди них встречаются серии-двойники, являющиеся полными схемотехническими аналогами и аналогами по типам корпусов и цоколёвке. Это объясняется тем, что с совершенствованием технологии оказалось возможным продублировать хорошо зарекомендовавшие себя и нашедшие широкое применение серии микросхем новыми сериями с более высокими техническими характеристиками, обеспечив возможность легкой замены устаревших микросхем новыми в уже разработанных узлах РЭС. Так, включение диодов Шоттки в структуру базового элемента ТТЛ-серий привело к созданию микросхем с меньшим энергопотреблением, появление «охранного кольца» в структуре КМДП привело к разработке на смену серии К176 ИМС серий 564, К561, К1564, работающих в широком диапазоне напряжений питания – от +3 до +15 В.

Существующие при этом «старые» серии 133, К155, К176 и другие будут выпускаться еще долго, так как сроки разработки, производства и эксплуатации РЭС на объектах установки обычно растягиваются на десятки лет, а модернизация, включающая замену электронного оборудования на более современное, стоит дорого и практикуется редко. Поэтому выпуск устаревших серий ИМС, необходимых для комплектования запасного имущества и принадлежностей (ЗИП) для ремонта находящихся в эксплуатации РЭС старых выпусков, продолжается долгие годы. Применение устаревшей компонентной базы в новых разработках при этом ограничивается специальными ведомственными и межведомственными документами. Порядок применения покупных изделий, включая оформление разрешения на применение, регламентируется ГОСТ 2.124-85.

При выборе серии логических ИМС для РЭС (ЭВС) следует, как всегда, исходить из условий задачи по быстродействию проектируемого цифрового устройства, совместимости его по уровням напряжений входных и выходных сигналов, входным и выходным токам с другими узлами и блоками комплекса РЭС объекта, наличия или отсутствия на объекте установки ограничений по энергопотреблению, массогабаритным показателям, из условий эксплуатации устройства на объекте.

В табл. 1.16 приводится сводка данных по устойчивости микросхем к воздействиям окружающей среды. Следует отметить, что эти данные мало отличаются от данных табл. 1.15, поскольку устойчивость микросхем любых типов, как аналоговых, так и цифровых, к внешним воздействиям определяется, в основном защитными свойствами корпуса. Это не касается только такого не рассматриваемого здесь показателя, как устойчивость к воздействию проникающей радиации, которая зависит от схемотехники и технологии производства ИМС.



Таблица 1.16

Эксплуатационные показатели некоторых серий логических микросхем

Показатель	Серия				
	133	1533	K555	564	KC561
<i>Эксплуатационные показатели</i>					
Вибрация: диапазон частот, Гц ускорение, м/с <sup>2</sup>	1...5000 400	1...5000 400	1...2000 200	1...5000 400	1...2000 200
Многokrатные удары: ускорение, м/с <sup>2</sup> при длительности импульса, мс	1500 1...3	1500 1...5	1500 1...5	1500 1...3	1500 1...5
Однократный удар: ускорение, м/с <sup>2</sup> при длительности импульса, мс	10000 0,2...1,0	15000 0,1...1,0	1500 0,1...2,0	10000 0,2...1,0	1500 0,1...2,0
Линейное ускорение, м/с <sup>2</sup>	1500	5000	5000	5000	5000
Акустический шум: диапазон частот, Гц; интенсивность, дБ	–	50...10000 170	–	–	–
Атмосферное давление, Па: пониженное повышенное,	0,67·10 <sup>3</sup> 2,94·10 <sup>5</sup>	0,67·10 <sup>3</sup> 2,94·10 <sup>5</sup>	2,66·10 <sup>4</sup> 2,94·10 <sup>5</sup>	– –	– –
Температура, °С	–60...+125	–60...+125	–10...+70	–60...+125	–45...+100
Относительная влажность при 35°С, %	98	–	–	98	–
Иней, роса	Устойчивы	Устойчивы	–	Устойчивы	–
Соляной туман	–	–	–	–	–
Плесневые грибы	–	–	–	–	–
<i>Показатели надёжности</i>					
Минимальная наработка, ч	50 000	100 000	50 000	15 000	50 000
Срок сохраняемости, лет	15	25	12	15	15

Обозначение документов на поставку микросхем (технические условия), как правило, включает кроме номера технических условий (ТУ) на серию в целом ещё и дополнительный номер исполнения на каждую микросхему внутри серии. Записи в конструкторской документации и при заказе поставки должны включать слово «микросхема», наименование микросхемы и обозначение документа на поставку, например:

*Микросхема 1533ТМ5 бК0.347.364-17 ТУ.*

### 1.3.6. Транзисторы и диоды

Основные признаки, по которым проводится классификация транзисторов, следующие.

По принципу управления током транзисторы подразделяются на биполярные и полевые.

Биполярные по типу комбинации проводимостей структуры делятся на транзисторы *p-n-p*- и *n-p-n*-типа.

Полевые транзисторы по типу проводимости канала делятся на транзисторы с *p*- и *n*-каналом.

По способу получения проводящего канала полевые транзисторы делятся на транзисторы с управляющим *p-n*-переходом и МДП-транзисторы.

МДП-транзисторы делятся на транзисторы со встроенным и с индуцированным каналом.

Внутри каждого из перечисленных классов транзисторы делятся на приборы малой, средней и большой мощности, низкочастотные, высокочастотные, СВЧ-диапазона и импульсные.

Кроме этого, может быть проведено различие по используемым полупроводниковым материалам, по технологии создания структуры транзистора и т. п.

Номенклатура выпускаемых транзисторов и полупроводниковых диодов насчитывает тысячи позиций, поэтому полный обзор информации по их техническим характеристикам в данном пособии невозможен. Ограничимся подборкой данных по эксплуатационным показателям нескольких широко используемых типов кремниевых транзисторов (табл. 1.17).

Таблица 1.17

Эксплуатационные показатели некоторых типов транзисторов

Показатель	Тип транзистора				
	КТ316	2Т316	КТ601	2Т601	КТ819
<i>Эксплуатационные показатели</i>					
Вибрация: диапазон частот, Гц; ускорение, м/с <sup>2</sup>	1...5000 400	1...5000 400	1...2000 200	1...5000 400	1...2000 200
Многokратные удары: ускорение, м/с <sup>2</sup> длительность импульса, мс	1500 1...3	1500 1...5	1500 1...5	1500 1...3	1500 1...5
Однократный удар: ускорение, м/с <sup>2</sup> ; длительность импульса, мс	10 000 0,2...1,0	15 000 0,1...1,0	1500 0,1...2,0	10 000 0,2...1,0	1500 0,1...2,0
Линейное ускорение, м/с <sup>2</sup>	1500	5000	5000	5000	5000
Атмосферное давление, Па: пониженное повышенное	0,67·10 <sup>3</sup> 2,94·10 <sup>5</sup>	0,67·10 <sup>3</sup> 2,94·10 <sup>5</sup>	2,66·10 <sup>4</sup> 2,94·10 <sup>5</sup>	–	–
Температура, °С	–60...+125	–60...+125	–10...+70	–60...+125	–45...+100

Показатель	Тип транзистора				
	КТ316	2Т316	КТ601	2Т601	КТ819
Относительная влажность при 35 °С, %	98	–	–	98	–
<i>Показатели надёжности</i>					
Интенсивность отказов, 1/ч	$0,352 \cdot 10^{-6}$	$0,044 \cdot 10^{-6}$	$0,312 \cdot 10^{-6}$	$0,039 \cdot 10^{-6}$	$0,044 \cdot 10^{-6}$
Срок сохраняемости, лет	15	25	12	15	15

В табл. 1.17 представлена информация для транзисторов одного типа, но предназначенных для использования в РЭС общепромышленного и специального назначения (буква «К» или цифра 2 перед обозначением).

### 1.3.7. Электрические соединители

Применение электрических соединителей для присоединения модулей первого уровня (ячеек) вносит свои плюсы и минусы в технические характеристики разрабатываемых модулей и блоков РЭС.

Контакт металлических поверхностей между собой – сложное нелинейное явление. При соприкосновении металлических поверхностей электрический контакт имеет место не по всей поверхности, а только на выступающих зубцах шероховатостей. В результате локальные значения плотности тока могут намного превышать среднюю по всей площади контакта величину, вызывая локальный перегрев и окисление металла. Контактующие поверхности могут быть окисленными, а разрушение оксидной плёнки – неравномерным по поверхности контакта. Переходное сопротивление электрического контакта зависит от физико-химической природы контактирующих металлов, напряжения, под которым находится контакт, протекающего тока. Разъёмный электрический контакт подвержен влиянию таких внешних факторов, как температура, атмосферное давление, влажность воздуха. Возможна электролитическая коррозия. При неудачном подборе контактирующих металлов на контакте возникает контактная разность потенциалов. Поэтому главным минусом разъёмных конструкций РЭС является потенциальное снижение надёжности.

С другой стороны, плюсом разъёмных конструкций являются их технологичность и ремонтпригодность. В разъёмной конструкции можно быстро заменить отказавший модуль, затем отремонтировать его, проверить на стенде и вернуть на место или в комплект запасных частей.

Таким образом, в основе выбора типа конструкции должен лежать компромисс между потенциальным снижением надёжности и необходимостью обеспечения технологичности и ремонтпригодности проектируемых РЭС.

Принято считать, что изделия индивидуального и мелкосерийного производства, изделия, не нуждающиеся в оперативной замене отказавших модулей, изделия одноразового использования могут иметь неразъёмную конструкцию.

Изделия же крупносерийного и массового производства, комплектуемые модулями, поступающими от разных производителей, и изделия, по условиям использования которых требуется оперативная замена модулей в случае отказа, предпочтительно изготавливать в виде разъёмных конструкций.

Известно множество конструкций электрических соединителей. По конструкции контакта всё множество может быть сведено к трём разновидностям: контакты, работающие «на прижим», ножевые контакты (плоский контакт-нож вдвигается в пружинящие губки розетки) и штыревые контакты (штырь круглого сечения входит в упругое разрезное или подпружиненное гнездо).

В ячейках на печатных платах широко применяются «печатные» соединители: на одном из краев платы создается проводящий рисунок в виде контактных пластин (ламель), а плата обрезается таким образом, чтобы образовалась «вилка» соединителя. Другая часть соединителя – розетка – выпускается в виде самостоятельного компонента и приобретает как комплектующее изделие. Несмотря на широкое распространение, такие соединители являются не самыми надёжными.

Наиболее надёжными являются соединители с «гиперболическими» контактами: контакты розетки выполняются в виде натянутых между двумя кольцами проволок-струн, образующих при взаимном развороте этих колец поверхность, известную под названием гиперболического параболоида. Штыри вилки надёжно охватываются проволоками гнезда розетки со всех сторон, образуя низкоомный, высоконадёжный контакт. Соединители данного вида имеют обозначение ГРПМ.

Тип электрического соединителя выбирается с учётом его электрической нагрузки и допустимого тока, протекающего через контакты, вида тока, на который рассчитано применение соединителя, предельной частоты переменного тока, условий эксплуатации, надёжности. При использовании базовых несущих конструкций (БНК) применение различных типов соединителей регламентируется ГОСТ 26765.12-86. Приведем краткую сводку данных в соответствии с этим стандартом на два типа соединителей, используемых для установки и монтажа на печатные платы базовых несущих конструкций БНК-1.

### 1. Гиперболические соединители ГРПМ1

Предназначены для работы в цепях постоянного и переменного тока с частотой до 3 МГц.

Чертёж вилки соединителя ГРПМ1 показан на рис.1.6

Обозначение соединителей ГРПМ1 расшифровывается следующим образом:

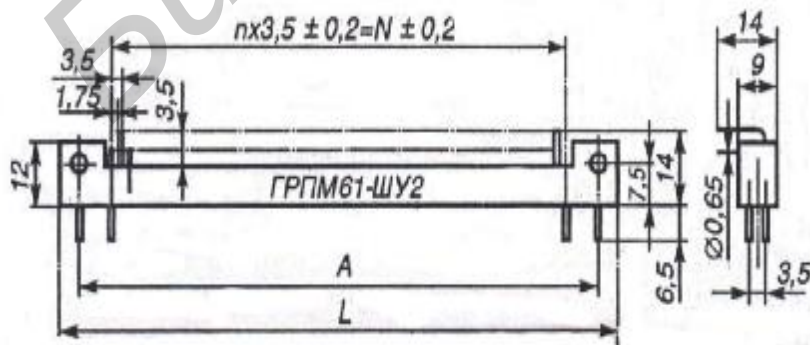
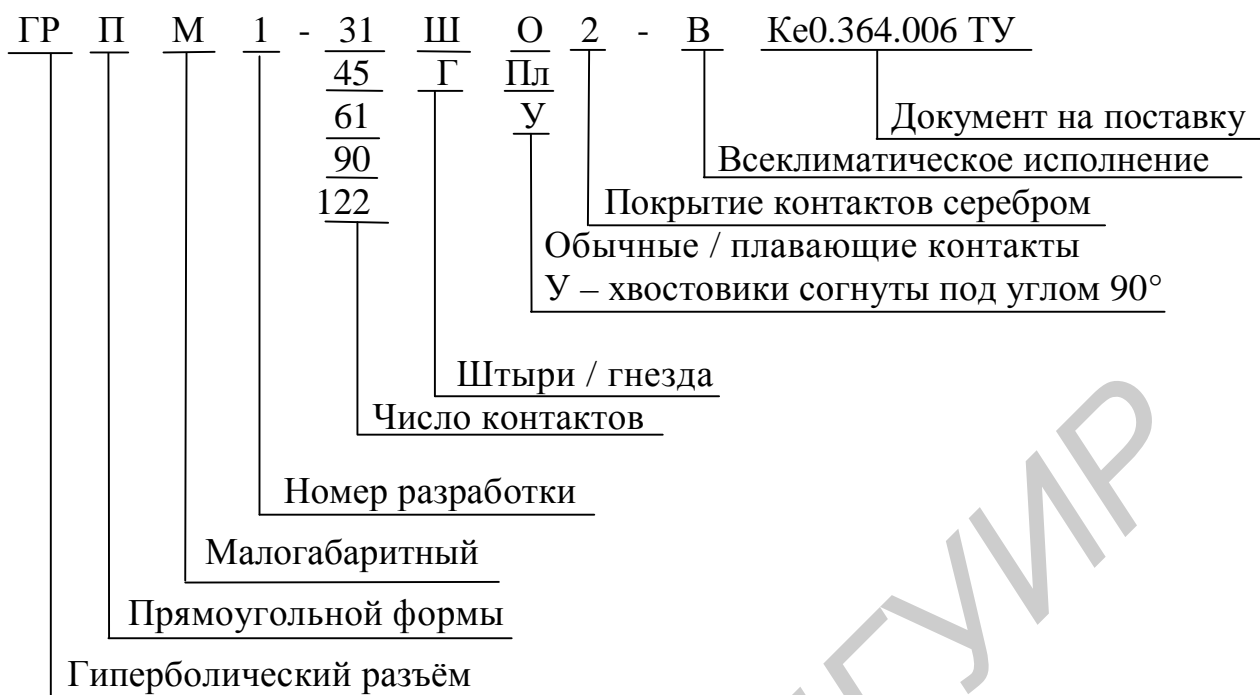


Рис. 1.6. Вилка электрического соединителя ГРПМ1



Геометрические размеры соединителей ГРПМ1 приводятся в табл.1.18.

Таблица 1.18

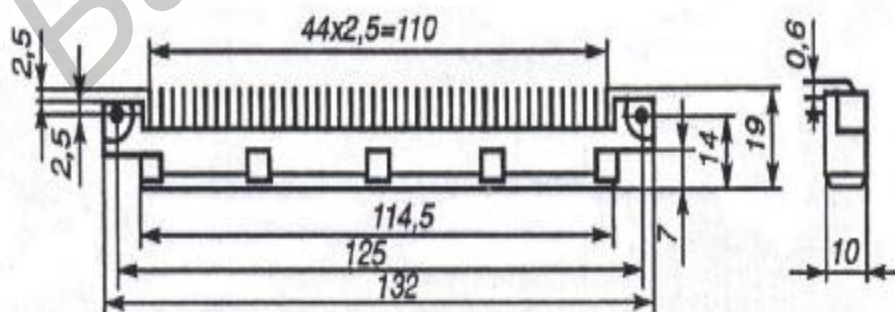
Геометрические размеры соединителей ГРПМ1

Количество контактов	A, мм	L, мм	N, мм	n, мм
31	68	78	52,5	15
45	92	102	77,0	22
61	120	130	105,0	30

## 2. Соединители ножевые прямоугольной формы СНП34

Предназначены для использования в цепях постоянного, переменного тока с частотой до 3 МГц и в импульсных режимах.

На печатную плату устанавливается розетка соединителя. Контакты располагаются в три ряда с шагом 2,5 мм вдоль и поперек колодки (рис. 1.7). Хвостовики контактов розетки изогнуты под углом 90° в сторону монтажных отверстий платы. Контакты покрыты золотом.



Обозначение соединителей данного типа расшифровывается следующим образом:

Рис. 1.7. Розетка электрического соединителя СНП34



Точное попадание штырей вилки в гнезда розетки при сочленении обеспечивается элементами конструкции соединителей и самой ячейки:

- в корпус вилки ГРПМ1 запрессованы два штыря-ловителя разных диаметров, попадающие в гнезда розетки;
- контакты вилки и розетки ГРПМ1 расположены в два ряда с неодинаковым числом контактов в ряду, в результате чего исключается возможность сочленения вилки, развернутой на 180°, с розеткой;
- на одной боковой стороне колодки розетки СНП34 выполнены углубления прямоугольной формы (видны на рис.1.7), в которые при сочленении входят «ответные» выступы на колодке вилки;
- при сборке ячейки на плату устанавливается индивидуальная кодовая планка, исключая установку ячейки в «чужое» гнездо или в развернутом положении в модуль высшего уровня.

Данные по устойчивости соединителей ГРПМ1 и СНП34 к воздействиям факторов окружающей среды приводятся в табл.1.19.

Таблица 1.19

Эксплуатационные характеристики соединителей

Вид воздействия	Тип соединителя	
	ГРПМ1	СНП34
Температура окружающей среды (без учёта перегрева контактов), °С	-60...+85	-60...+85
Относительная влажность воздуха при температуре +35 °С, %	98	98
Атмосферное давление, Па	$1,07 \cdot 10^5 \dots 1,33 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^5 \dots 1,33 \cdot 10^{-4}$
Повышенное атмосферное давление, Па	$2,97 \cdot 10^5$	$2,97 \cdot 10^5$
Вибрация: диапазон частот, Гц ускорение, м/с <sup>2</sup>	5...4000 300	1...3000 200

Вид воздействия	Тип соединителя	
	ГРПМ1	СНП34
Многokратные удары: ускорение, м/с <sup>2</sup> длительность импульса, мс	350 1...80	400 2...10
Однократный удар: ускорение, м/с <sup>2</sup> длительность импульса, мс	1500 0,2...1,0	5000 1,0...2,0
Линейное ускорение, м/с <sup>2</sup>	500	500
Акустический шум: диапазон частот, Гц звуковое давление, дБ	–	50... 10000 130
Иней, роса	–	Устойчив
Соляной туман	–	Устойчив
Солнечная радиация	–	Устойчив
Плесневые грибы	–	Устойчив

Технические характеристики соединителей ГРПМ1 и СНП34 приведены в табл. 1.20.

Таблица 1.20

## Технические характеристики соединителей

Параметры	Тип соединителя	
	ГРПМ1	СНП34
Ток, протекающий через контактную пару: максимальный, А минимальный, мкА	2,0 1,0	1,0 –
Максимальный рабочий ток на одиночный контакт <sup>1</sup> , А	3,0	1,5
Суммарная токовая нагрузка / при числе контактов, А	46/31 67/45 91/61	–
Температура перегрева контактов, не более, °С	30	30
Максимальное рабочее напряжение, В	250	100
Сопротивление контакта, не более, Ом	0,005	0,015
Ёмкость между соседними контактами, пФ, не более	2,5	3,0
Сопротивление изоляции: в нормальных условиях, не менее МОм после воздействия повышенной температуры, не менее МОм после кратковременного воздействия повышенной влажности, не менее МОм	1000 50 20	5000 50 20
Усилие расчленения, Н / при числе контактов	46,3 / 31 71,4 / 45 91,8 / 61	78,4 / 69 156,8 / 135

Параметры	Тип соединителя	
	ГРПМ1	СНП34
Минимальная наработка, ч / при числе сочленений-расчленений, не менее	5000 / 1000	15000 / 500
Интенсивность отказов, 1/ч <sup>2</sup>	0,091·10 <sup>-6</sup>	0,229·10 <sup>-6</sup>
Срок сохраняемости, лет	15	15

*Примечания:*

1. Контакты разрешается нагружать максимальным током через один.

2. Для соединителей ГРПМ1 (45 контактов) и СНП34 (90 контактов) с уровнем качества изготовления, соответствующим приёмке «5» – общее военное применение (ОВП).

Запись в конструкторской документации состоит из обозначения части соединителя – слова «Вилка» или «Розетка», условного обозначения и обозначения документа на поставку.

Примеры записи в конструкторской документации:

- для вилки ГРПМ1 45-контактной с посеребренными контактами, с согнутыми под углом 90° хвостовиками для монтажа на печатной плате:

*Вилка ГРПМ1 – 45У2 – В Ке0.364.006 ТУ;*

- для розетки 61-контактной с плавающими гнездами, предназначенной для объёмного монтажа:

*Розетка ГРПМ1 – 61ГШ2 – В Ке0.364.006 ТУ;*

- для розетки СНП34 135-контактной для монтажа на печатной плате:

*Розетка СНП34 – 135 / 132x12 В – 21 – В бРО.364.009 ТУ.*

#### **1.4. Конструкция РЭС и конструкторская иерархия**

Под конструкцией РЭС понимается совокупность деталей и материалов с разными физическими свойствами, находящаяся в определённой физической связи (электромагнитной, тепловой, механической и др.), обеспечивающая выполнение заданных функций с необходимой точностью под влиянием внешних и внутренних воздействий и воспроизводимая в условиях производства.

Конструкция РЭС характеризуется рядом особенностей, которые выделяют её в отдельный класс среди других конструкций:

1) иерархической структурой, под которой подразумевается последовательное объединение более простых электронных устройств (узлов) в более сложные;

2) доминирующей ролью электрических и электромагнитных связей;

3) наличием паразитных связей, порождающих помехи (наводки);

4) наличием тепловых полей;

5) слабой связью внутренней структуры конструкции с ее внешним оформлением.

Конструкторская иерархия реализуется с помощью уровней разукрупнения РЭС, габаритные размеры которых стандартизованы. Конструкции нижестоящего уровня совместимы с конструкциями вышестоящих уровней. По кон-



структивной сложности различают следующие уровни разукрупнения РЭС: стойка (шкаф), блок, ячейка.

Совокупность уровней разукрупнения РЭС определенного назначения образует конструкционную систему. Известны конструкционные системы РЭС измерительных приборов, электронно-вычислительной, телевизионной аппаратуры, аппаратуры электросвязи и др.

## 1.5. Классификация РЭС

Классификация РЭА по функциональному назначению и принципу действия поясняется рис. 1.8.



Рис. 1.8. Классификация РЭА по функциональному назначению и принципу действия

В рамках каждой из групп, указанных на рис. 1.8, РЭА может классифицироваться далее также по функциональному назначению. Например, радиотехническую аппаратуру можно разделить на радиопередающую, радиоприёмную, приёмопередающую и т. д.

По частотному диапазону генерируемых и обрабатываемых сигналов различают радиоэлектронные устройства:

- низких частот (НЧ);
- высоких частот (ВЧ);
- сверхвысоких частот (СВЧ).

По характеру изменения сигналов, обрабатываемых аппаратурой, различают:

- аналоговые устройства;
- устройства цифровой обработки информации;
- аналого-цифровые устройства.

По режимам применения (функционирования) РЭУ подразделяют:

- устройства непрерывного длительного применения;
- устройства многократного циклического применения;
- устройства однократного применения.

В зависимости от глобальной сферы использования (земля, вода, воздух)

РЭА подразделяют:

- наземную;
- морскую;
- бортовую (воздушное и космическое пространство).

Внутри каждой категории (класса) различают специализированные группы в зависимости от объекта установки. Например, категория наземных РЭС включает в себя такие основные группы:

- стационарные РЭС;
- передвижные РЭС (РЭС, используемые на подвижных объектах);
- носимые (переносные) РЭС.

Особенности стационарных РЭС:

- 1) продолжительность эксплуатации;
- 2) работа в помещениях с нормальными климатическими условиями;
- 3) транспортирование в специальной упаковке для защиты от механических воздействий (МВ), влаги и других дестабилизирующих факторов;
- 4) высокая ремонтпригодность;
- 5) ограничения на габариты и массу одной стойки (шкафа) для удобства транспортирования, выгрузки и т.д.

Группа передвижных РЭС имеет три основные особенности:

- повышенные требования к защите от МВ;
- защитные мероприятия от возможных воздействий влаги и пыли;
- возможность погрузки и разгрузки силами двух человек (для массивных РЭС).

К этой группе относят связные, радиолокационные и пеленгаторные станции, диспетчерские станции строителей, передвижные телевизионные студии, автомагнитолы и т.п.

В зависимости от назначения и характера ответственности задач, возлагаемых на РЭС, различают:

- бытовые РЭС;
- профессиональные РЭС;
- РЭС военной техники и спецназначения.

Бытовые РЭС характеризуются следующими особенностями:

- 1) повышенной эстетичностью внешнего вида и качеством акустических характеристик;
- 2) возможностью эксплуатации иногда совершенно неподготовленным человеком;
- 3) массовостью производства;
- 4) определяющим значением стоимости.

Для поддержания спроса у населения используют три основных направления в развитии конструкций бытовых РЭС:

- создание принципиально новых РЭС, вызывающих новые потребности у населения, не зависящие от наличия у потенциальных покупателей старых конструкций (например появление в своё время цветных телевизоров и т.д.);

- совершенствование ранее выпускавшихся конструкций с целью максимальной автоматизации управления, улучшения характеристик и введения новых функций (например введение дистанционного управления работой музыкального центра и др.);

- повышение технологичности с целью снижения стоимости.

Морские РЭС включают в себя три основные группы:

- судовые (пассажирские, грузовые суда);
- корабельные (морские суда ВМФ);
- буйковые РЭС.

Основные особенности морских РЭС:

1) комплексное воздействие климатических и механических факторов (например, 100 %-я влажность при повышенной температуре в солевом тумане и при МВ от двигательных установок);

2) длительная автономная работа с отрывом от ремонтных баз.

Группы бортовых РЭС:

- самолётные;
- вертолётные;
- ракетные;
- космические.

Основные требования к бортовым РЭС:

1) минимальные масса и объём;

2) высокая надёжность;

3) стойкость к действию разнообразных воздействующих факторов (МВ, температура, давление и т.д.).

По возможности восстановления работоспособного состояния после отказа различают восстанавливаемые и невосстанавливаемые РЭС.

*Восстанавливаемые* РЭС в случае возникновения отказа подвергаются ремонту и далее снова используются по назначению. *Невосстанавливаемые* РЭС не подлежат либо не поддаются ремонту по техническим или экономическим соображениям.

По необходимости проведения технического обслуживания в процессе эксплуатации РЭС подразделяют на *обслуживаемые* и *необслуживаемые*.

Приведённая классификация является далеко неполной, но достаточной для решения основных задач конструкторского проектирования РЭС. Классификация может быть продолжена в зависимости от характера проектных задач путём выбора классификационных признаков. Например, с основными признаками, по которым подразделяют РЭС при задании требований к надёжности, можно ознакомиться в ГОСТ 27.003–90.

## 1.6. Классы исполнения РЭС по условиям их эксплуатации

В соответствии с ГОСТ 15150-69 установлены следующие классы исполнения изделий по условиям их эксплуатации в макроклиматических районах:

- У (N) – для районов с умеренным климатом;
- УХЛ (NF) – с умеренным и холодным климатом;
- ХЛ (F) – с холодным климатом;
- ТВ (TH) – с влажным тропическим климатом;
- ТС (TA) – с сухим тропическим климатом;
- Т (T) – с тропическим как сухим, так и влажным климатом;
- М (M) – с умеренно холодным морским климатом;
- ТМ (TM) – с тропическим морским климатом;
- О (U) – все районы, кроме районов с морским климатом;
- ОМ (MU) – с морским климатом;
- В (W) – все макроклиматические районы.

В скобках приведены обозначения, принятые в некоторых странах Европы, бывших членов СЭВ.

Обозначение ХЛ рекомендуется вместо обозначения УХЛ в случаях, если основным назначением изделий является эксплуатация в районе с холодным климатом и экономически нецелесообразно их использование вне пределов этого района.

В зависимости от места размещения изделия при эксплуатации в воздушной среде установлены следующие категории размещения:

- 1 – на открытом воздухе;
- 2 – под навесом или в помещениях, где условия эксплуатации существенно отличаются от категории 1;
- 3 – в закрытых помещениях (объёмах) с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий;
- 4 – в помещениях (объёмах) с искусственно регулируемыми климатическими условиями;
- 5 – в помещениях с повышенной влажностью (шахты, подвалы и т.д.).

Стандарт устанавливает нормы температуры, влажности и других эксплуатационных факторов для данного класса и категории. Например, для изделий исполнений УХЛ4 рабочие значения температуры при эксплуатации составляют  $+1...+35$  °С, предельные рабочие значения температуры: нижнее значение – плюс 1 °С, верхнее значение – плюс 40 °С, верхнее значение относительной влажности – 80 % при температуре  $+25$  °С.

## 2. МЕТОДОЛОГИЯ КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

### 2.1. Особенности процесса конструирования

Исходными данными для конструирования изделия являются техническое задание (ТЗ) и электрическая принципиальная схема.

В работе конструктора можно выделить следующие составляющие:

- 1) творческая – анализ и синтез различных вариантов конструктивного исполнения;
- 2) техническая – расчёты и выпуск конструкторской документации;
- 3) организационная – руководство исполнителями, проверка, согласование конструкторской документации, передача в архив;
- 4) производственная – сопровождение изготовления изделия;
- 5) корректировочная – изменение конструкторской документации в связи с исправлением ошибок, заменой материалов, усовершенствованием конструкции и т.д.

Наиболее сложной и важной является творческая часть работы, при выполнении которой решаются две задачи:

- анализ – изучение поведения конструкции с заданной структурой, т.е. изучение зависимости показателей качества от отдельных факторов и их совокупности;
- синтез – определение оптимальной структуры конструкции при заданных показателях качества и ограничениях, т.е. генерация некоторого количества новых вариантов конструкторских решений.

На этом этапе наиболее полно проявляются интуиция, опыт и творческие способности конструктора, усиленные коллективной работой с коллегами и использованием диалогового режима между человеком и ЭВМ.

Анализ вариантов конструкции осуществляют, как правило, тремя методами:

- 1) логико-расчётным;
- 2) эвристическим;
- 3) методом моделирования.

*Логико-расчётный* метод основан на использовании формализованных процессов, повторное применение которых дает сравнимые результаты (расчёты отдельных элементов, блоков и т.д. с использованием ЭВМ).

*Эвристический* метод – метод экспертных оценок – заключается в том, что для группы специалистов-экспертов формулируют проблему и используют их профессиональный опыт для решения проблемы. Иногда этот метод называют методом мозгового штурма.

При использовании метода *моделирования* анализ проводят не на самих реальных объектах проектирования, а на их моделях – математических или физических.

## 2.2. Стадии разработки РЭС

Ввиду того, что требования к параметрам разрабатываемых РЭС часто противоречивы (например малая стоимость и высокая надёжность), исходная информация для вновь создаваемых изделий не является достаточно полной, а исполнители при работе могут допускать ошибки, разработку РЭС и их конструкций осуществляют в несколько стадий (обычно не менее двух):

- НИР (научно-исследовательская работа);
- ОКР (опытно-конструкторская работа).

Каждая стадия включает несколько этапов. Основные этапы проведения НИР:

- 1) патентный поиск;
- 2) разработка и согласование с заказчиком технического задания (ТЗ) и государственная регистрация НИР;
- 3) подготовительный этап – выбор направлений исследования, разработка, согласование и утверждение частных ТЗ на основные части НИР;
- 4) основной этап – теоретические и экспериментальные исследования (расчёты, моделирование), обработка результатов исследований, составление и оформление технической документации;
- 5) заключительный этап – обобщение результатов и оценка выполненной НИР;
- 6) приёмка НИР, обсуждение и согласование задания на проведение ОКР, государственный учёт НИР.

Этапы проведения ОКР:

- техническое задание;
- техническое предложение;
- эскизный проект;
- технический проект;
- рабочая документация.

*Техническое задание* (ТЗ) составляется исполнителем на основании технических требований (ТТ) заказчика. На основе общего ТЗ могут быть составлены частные ТЗ для субподрядчиков.

*Техническое предложение* – этап разработки, на котором исполнителем обосновывается принципиальная возможность создания РЭС с заданными по ТТ характеристиками и намечаются основные технические и организационные решения по выполнению ТЗ.

*Эскизный проект* – этап, на котором вырабатываются принципиальные инженерные и конструктивные решения, дающие общие представления об устройстве и принципе работы изделия, а также данные, определяющие его назначение и основные параметры.

*Технический проект* – этап, на котором разрабатывается совокупность конструкторских документов, содержащих окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия.

*Рабочая конструкторская документация* – разработка конструкторской документации, предназначенной для изготовления опытного образца или опытной партии изделий. При разработке РЭС в условиях промышленного производства этап разработки конструкторской документации может включать три основные составляющие:

- проектирование изделия на платах с печатным монтажом. Сюда входит обоснование и выбор системы базовых несущих конструкций (БНК), выбор типоразмера печатной платы, размещение электрорадиокомпонентов на поле платы, проектирование топологии печатного рисунка, в том числе и с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР);
- разработка конструкции и выпуск комплекта конструкторской документации на печатную плату и другие элементы конструкции – каркасы, рамы, панели, элементы крепления и др.;
- объёмное художественное конструирование модулей высоких уровней (блок, шкаф, стойка) с демонстрацией средствами компьютерной анимации вхождения в них модулей низших уровней, взаимодействия элементов конструкции при сборке и в процессе эксплуатации.

### **2.3. Организация процесса конструирования**

В создании РЭС участвуют различные организации, подразделения, исполнители. Организации могут выполнять функции заказчика, исполнителя и субподрядчика.

Заказчик формулирует технические требования к РЭС и осуществляет приёмку разработанного изделия. ТТ определяют технические показатели РЭС (мощность, чувствительность и т.д.), а также содержат требования к конструкции:

- наименования, количество и назначение основных частей;
- габаритные, установочные и присоединительные размеры;
- требования по взаимозаменяемости частей, унификации, типизации, стандартизации и преемственности.

Кроме того, ТТ включают требования:

- по охране окружающей среды;
- помехозащищённости;
- составу запасного имущества;
- безопасности работы;
- эргономике и эстетике;
- условиям эксплуатации и т.д.

Исполнитель на основании ТТ разрабатывает ТЗ, в котором содержатся экономические, производственные и другие требования, определяется порядок разработки и приёмки изделия.

Субподрядчик решает для исполнителя частные вопросы:

- разработка и поставка новых материалов, элементов, узлов;
- разработка технологических процессов;

- разработка методов измерений, проведения испытаний и т.д.

При проектировании конструкции РЭС в той или иной степени принимают участие различные подразделения предприятий:

- системотехнические (определение структуры РЭС, например «разбивка на наземную и бортовую части»);
- схемотехнические (разработка принципиальной схемы);
- конструкторские (общая компоновка, выпуск конструкторской документации, сопровождение производства);
- технологические (установление последовательности изготовления, отработка режимов технологических процессов, подготовка производства);
- производственные (изготовление РЭС).

Кроме того, в процессе разработки и изготовлении принимают участие вспомогательные службы:

- надёжности (рекомендации по структурной и информационной избыточности, проведение испытаний);
- снабженческие (поставка покупных изделий и материалов);
- патентные;
- автоматизированного конструкторского проектирования и др.

Координация работы предприятия, подразделений и специалистов осуществляется с помощью согласованных календарных планов или сетевых графиков.

#### **2.4. Особенность системного подхода к проектированию конструкций РЭС**

Детальное рассмотрение конструкций РЭС показывает, что они проявляют признаки систем, т.е. представляют собой единое целое, состоящее из составных частей, выполняющих какую-то общую задачу. Поэтому для проектирования конструкций применим такой же подход, как и при проектировании систем. Он получил название системного подхода.

Опыт проектирования показывает, что использование системного подхода позволяет достичь более высокие качественные показатели конструкций, нежели при традиционном подходе к конструированию.

В самом общем виде системный подход к проектированию конструкций РЭС заключается в учёте на всех этапах проектирования связи, отражаемой схемой, показанной на рис. 2.1.

Основными особенностями системного подхода применительно к проектированию конструкций являются:

1) необходимость рассмотрения альтернативных вариантов, которые предположительно могут привести к получению сопоставимых результатов. Это прежде всего касается выбора источников энергии, используемых материалов, компоновочных схем, комплектующих изделий. Выбранные решения должны наиболее адекватно удовлетворять требованиям к конструкции;



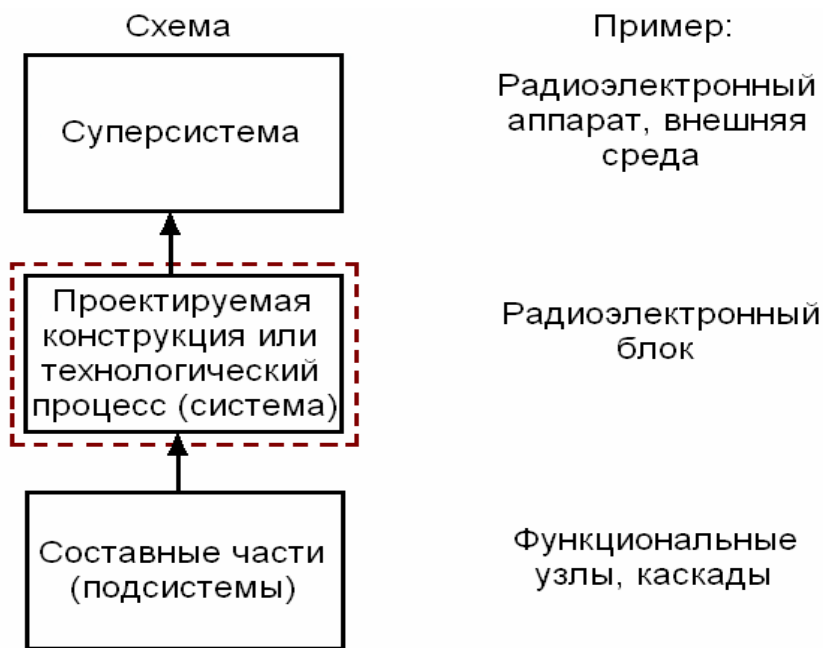


Рис. 2.1. К понятию системного подхода

2) оценка качества конструкции, основываясь не только на общепринятых показателях, таких, как выходные параметры, стоимость, время разработки, удобство в обслуживании, надёжность и т.п., но и количественная оценка значения комплексного показателя качества;

3) учёт того, что конструкция РЭУ функционирует во внешней среде и в действительности является подсистемой некоторой другой

системы (суперсистемы). Решения, принимаемые при разработке конструкции РЭУ на любой стадии, обусловлены внешней средой, которая выступает в виде следующих факторов: физическое окружение; уровень науки и техники; форма структуры проектной организации; квалификация, опыт и интеллект персонала; время разработки; дополнительные факторы;

4) исследование эффективности конструкторских решений на основе моделирования без использования реальных устройств;

5) использование вероятностно-статистических методов при оценке решений, на результат которых влияют случайные параметры;

6) широкое использование ЭВМ и современного математического аппарата при оценке пригодности конструкторских решений.

### 3. МАТЕРИАЛЫ И НЕСУЩИЕ КОНСТРУКЦИИ РЭС

#### 3.1. Общие сведения о несущих конструкциях РЭС

Несущие конструкции предназначены для размещения компонентов РЭС и обеспечения их функционирования в реальных условиях эксплуатации. Их использование позволяет обеспечить компоновку, теплоотвод, экранирование и заземление, а также повысить надёжность и технологичность составных частей и изделия в целом.

Конструкционные системы – совокупность базовых несущих конструкций, находящихся в определенной соподчиненности на основе единого модуля и оптимальной технологии производства. Они предназначены для создания оптимальных компоновок РЭС с учётом функциональных, механических, тепловых факторов, требований эргономики и ремонтпригодности. Существует большое разнообразие конструкционных систем РЭС, предназначенных для различных видов аппаратуры:

- базовые несущие конструкции РЭС;
- базовые несущие конструкции ЭВМ;
- стойки аппаратуры систем передачи информации по проводным линиям связи;
- конструкционная система студийной телевизионной аппаратуры;
- шкафы и корпуса блоков электронных измерительных приборов;
- конструкционная система авиационной аппаратуры;
- базовые несущие конструкции судовой аппаратуры и т.д.

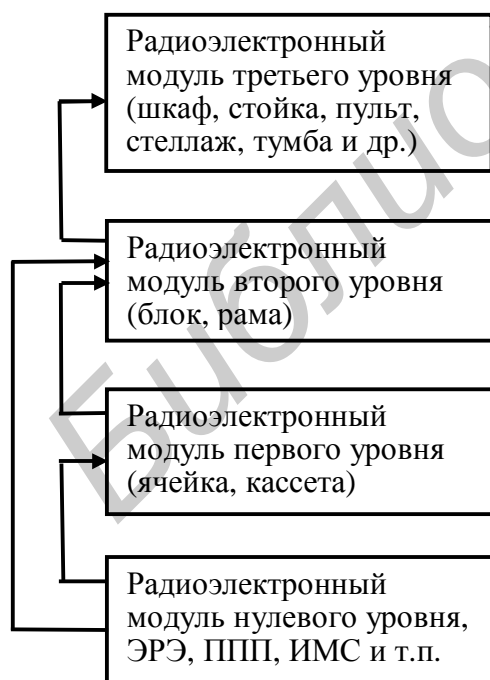


Рис. 3.1. Иерархия конструкционных систем РЭС

Для сложных РЭС в модульном исполнении употребительной является следующая иерархия конструкционных систем (рис. 3.1).

В качестве несущей конструкции для радиоэлектронного модуля (РЭМ) первого уровня чаще всего используются печатные платы, устанавливаемые на металлические рамки. Такая сборка представляет собой радиоэлектронную ячейку. На печатной плате устанавливаются модули нулевого уровня, ИМС, ППП, резисторы, конденсаторы, элементы коммутации, регулировки и т.д.

РЭМ нулевого уровня – РЭС, предназначенное для реализации функции преобразования информации или преобразования сигналов, выполненное на конструктивной основе, размерно координируемой с несущей конструкцией первого уровня, и обладающее свойствами конструктивной и функциональной взаимозаменяемости. При-

меры РЭМ нулевого уровня: контур фильтра промежуточной частоты, задающий кварцевый генератор в микромодульном исполнении и т.п.

Несущая конструкция *модуля второго уровня* может быть выполнена в виде рамы, корпуса блока. Основные разновидности корпусов – кассетная (разъёмная, рис. 3.2) и книжная (рис. 3.3) конструкции. Основной недостаток – увеличенные масса и объём из-за наличия разъёмов к каждой ячейке. Область использования – бытовая, измерительная аппаратура, ЭВМ и т.д.

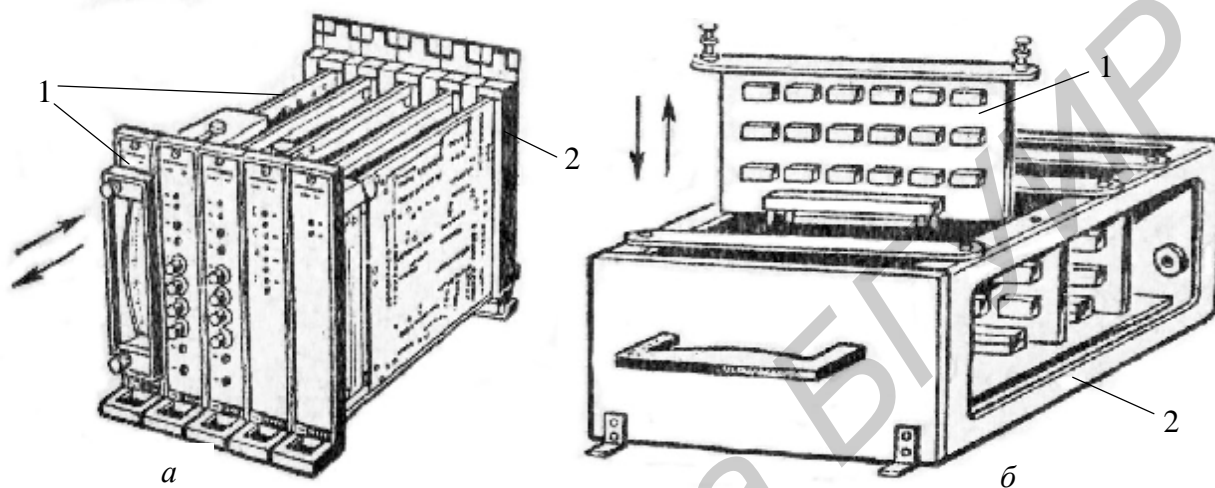


Рис. 3.2. Блок кассетной конструкции:

*а* – с выдвиганием легкосъёмных субблоков или кассет (функциональных ячеек) в горизонтальной плоскости; *б* – с выдвиганием функциональных ячеек в вертикальной плоскости (1 – функциональная ячейка; 2 – корпус блока)

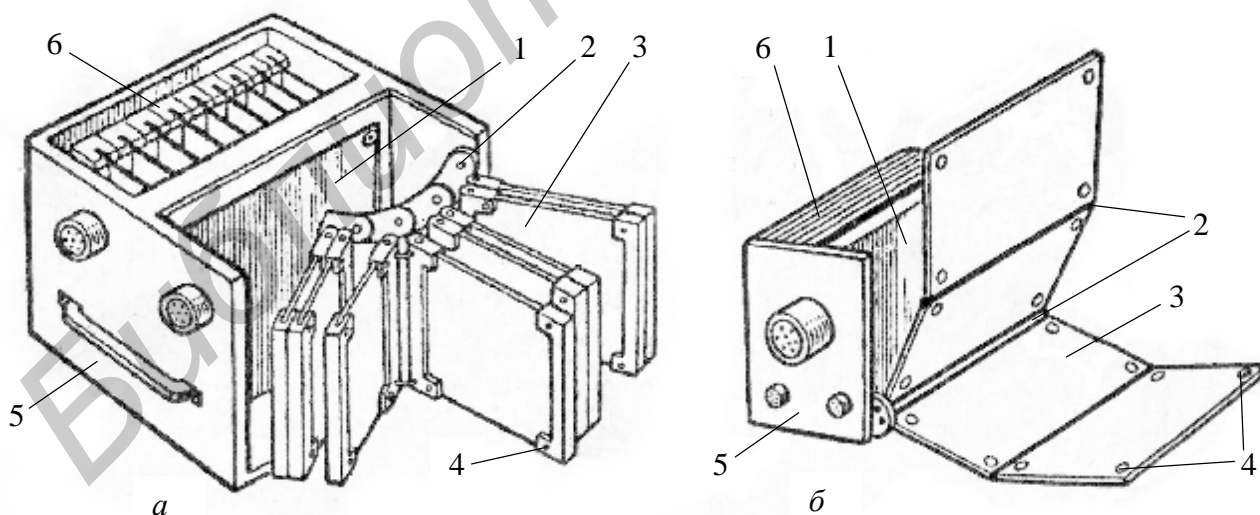


Рис. 3.3. Блок книжной конструкции:

*а* – с вертикальной осью раскрытия функциональных ячеек (субблоков);  
*б* – с горизонтальной осью раскрытия функциональных ячеек  
 (1 – общая трассировочная плата; 2 – шарниры; 3 – функциональная ячейка;  
 4 – отверстие для стягивания ячеек в секцию; 5 – передняя панель; 6 – стянутая секция)

Достоинства книжной компоновки – высокая компактность, малые масса и объём, легкий доступ к ИМС и ЭРЭ при ремонте, возможность проверки и отладки устройства во включенном состоянии. Недостаток – затруднённый демонтаж ячеек, что увеличивает время ремонта. Книжный вариант чаще всего применяется для бортовых устройств с высокой надёжностью, где требования уменьшения массы и габаритов являются доминирующими.

Несущими конструкциями *модулей третьего уровня* могут быть:

- для стационарной аппаратуры – шкафы, стойки, пульты;
- для бортовых РЭС – виброизоляция рама или стеллаж.

Более детальные параметры соответствующих конструкционных систем приводятся в отраслевых стандартах.

### 3.2. Конструктивные разновидности корпусов интегральных микросхем

Интегральная микросхема (ИМС) – микроэлектронное изделие, выполняющее определённую функцию преобразования, обработки сигнала и хранения информации и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединённых элементов (или элементов и компонентов) и (или) кристаллов, которое с точки зрения требований к испытаниям, приёмке, поставке и эксплуатации рассматривается как единое целое.

Различают два основных вида интегральных микросхем: полупроводниковые и гибридные.

**Полупроводниковая ИМС** – это монолитное устройство, в котором все элементы изготовлены на единой полупроводниковой подложке и в едином технологическом цикле. Особенность технологического процесса производства полупроводниковых ИМС заключается в том, что одновременно с изготовлением транзисторных структур необходимо получать диоды, резисторы и конденсаторы в соответствии с принципиальной схемой ИМС.

Принципиальным недостатком полупроводниковых ИМС является невозможность практической реализации на основе эффектов в полупроводниках индуктивных элементов, которые можно было бы использовать для выполнения определённых схемотехнических функций. К их недостаткам следует отнести и невозможность получения широкой шкалы номинальных значений сопротивлений диффузионных резисторов и ёмкостей конденсаторов.

**Гибридные интегральные схемы (ГИС)** – это устройства, в которых пассивные элементы (резисторы и конденсаторы) выполняются по плёночной технологии, а активные элементы являются навесными, т.е. компонентами. Степень миниатюризации ГИС определяется количеством используемых навесных компонентов, для размещения которых необходима определённая площадь, и геометрическими размерами плёночных элементов.

ГИС широко используются в устройствах СВЧ, а также в тех случаях, когда требуется получить конденсаторы большой ёмкости или мощные резисто-

ры. При массовом выпуске различных ИМС малой мощности, особенно предназначенных для ЭВМ, используются в основном полупроводниковые ИМС.

По варианту конструктивного исполнения различают корпусные и бескорпусные ИМС. Корпусные элементы используются в основном в негерметичных конструкциях. Их достоинством является защищённость элементов ИМС от дестабилизирующих факторов, а недостатками – увеличение габаритов, массы и стоимости из-за наличия корпуса и усложнения сборки, ухудшение теплоотвода, а также электрических параметров (из-за увеличения длины выводов, их сопротивления, индуктивности, межвыводной ёмкости). Однако применение корпусных ИМС не исключает необходимости защиты от дестабилизирующих факторов других элементов РЭС – проводников, печатных плат, электрических соединений и т.д.

Основные разновидности корпусов, используемых в настоящее время ИМС, представлены на рис. 3.4.

Они различаются формой, видом и расположением внешних выводов, которые бывают штырьковыми, планарными, расположенными с шагом 0,625; 1,0; 1,25; 1,7; и 2,5 мм.

Каждая разновидность корпуса имеет свои достоинства и недостатки. Так, например, корпус с планарными выводами для установки и монтажа требует на печатной плате почти вдвое большей площади, чем корпус с ортогональным расположением выводов. Однако установка таких корпусов возможна с двух сторон платы. Жесткие штыревые выводы с ортогональной ориентацией относительно плоскости основания позволяют устанавливать микросхемы на плату без дополнительного крепления даже при жестких вибрационных и ударных нагрузках. При совместной установке микросхем и ЭРЭ для упрощения монтажных работ рекомендуется использовать корпуса со штыревыми выводами.

Пластмассовые корпуса имеют низкую стоимость, хорошо противостоят механическим воздействиям, но хуже других типов корпусов защищают от климатических воздействий и перегрева. Для улучшения тепловыделения в пластмассовые корпуса некоторых интегральных микросхем вводятся теплоотводящие металлические шины.

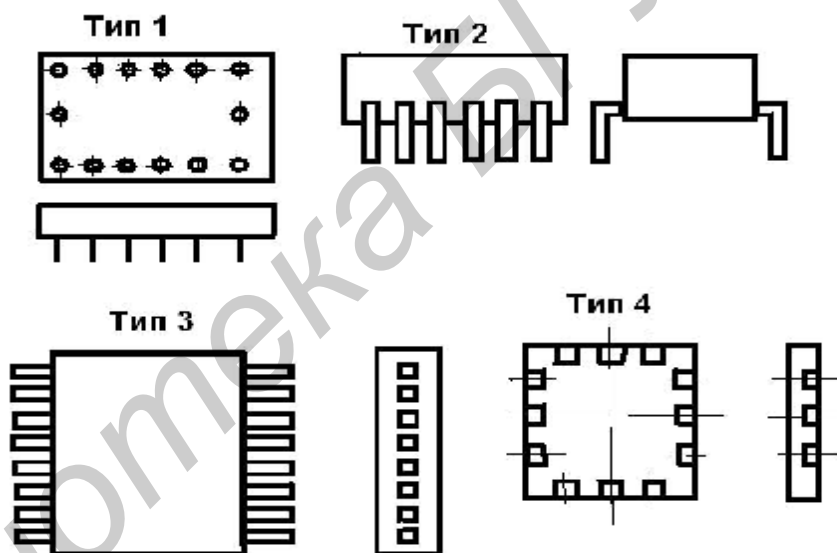


Рис. 3.4. Разновидности корпусов ИМС

### 3.3. Выбор материалов для конструктивных элементов РЭС

Выбор материалов для конструкций и деталей РЭС является сложной задачей из-за многовариантности, т.к. изделие РЭС можно создать либо из различных материалов, либо из их сложных совокупностей.

Правильный выбор материала может быть сделан на основе анализа функционального назначения детали, условий ее эксплуатации и технологических показателей с учётом следующих факторов.

1. *Материал является основой конструкции*, т.е. определяет способность детали выполнять рабочие функции в изделии и противостоять воздействию дестабилизирующих климатических и механических факторов. Например, в качестве диэлектрика конденсатора постоянной ёмкости, работающего в контуре высокой частоты, применяют материал с малым значением тангенса угла диэлектрических потерь. В противном случае конденсатор внесёт большое затухание в контур и снизит его добротность.

2. *Материал определяет технологические характеристики детали*, т.к. обрабатывается определенными технологическими методами. Например, объёмные детали из текстолита можно обрабатывать только резанием. Те же детали из пластмасс изготавливают прессованием, что даёт большую производительность при серийном и массовом производстве.

При прочих равных условиях выбирать следует тот материал, который допускает обработку наиболее прогрессивными методами: штамповкой, литьем, прессовкой, обработкой на станках-автоматах и т.д. Особенно это относится к деталям сложной формы, т.к. обработка их резанием увеличивает трудоёмкость и материальные затраты.

3. *От свойств материала зависит точность изготовления детали*. Точность штамповочных гнутых изделий зависит от упругих свойств материала, т.к. после изъятия детали из штампов она стремится в какой-то степени принять свою первоначальную форму. Отсюда следует, что деталь из мягкой стали при прочих равных условиях будет изготовлена с большей точностью, чем деталь из пружинящей стали.

4. *Материал влияет на габариты и массу прибора*. Так, использование алюминиевых сплавов взамен стали может дать уменьшение массы в 1,5–3 раза при полном удовлетворении требований к прочности и жёсткости.

5. *Материал определяет эксплуатационные характеристики детали, её надёжность и долговечность*. Контакты переключателя из латуни в сложных климатических условиях выдерживают незначительное число переключений. Срок службы этих контактов независимо от числа переключений также крайне ограничен, т.к. окисление материала с течением времени приводит к нарушению электрического контакта в переключателе. Эти детали, имеющие покрытия из золота или серебра, выдерживают десятки тысяч переключений и в определенных условиях могут эксплуатироваться годами. Однако применение таких материалов резко увеличивает стоимость детали. В любом случае применение

дефицитных и дорогостоящих материалов должно быть строго регламентировано и экономически обосновано.

При изготовлении элементов конструкций РЭС широко используются различные металлы и пластмассы. Пластмассы по сравнению с металлами обладают следующими достоинствами:

- меньшая плотность;
- химическая стойкость и влагостойкость;
- вибропоглощающая способность;
- прозрачность или полупрозрачность;
- легче обрабатываются;
- поддаются сплошной окраске (в объёме);
- меньшая стоимость и др.

Некоторые недостатки пластмасс:

- меньшая прочность;
- большие значения коэффициентов линейного расширения;
- меньшая теплостойкость;
- способность к поглощению влаги;
- воспламеняемость;
- ухудшение свойств при действии ультрафиолетового излучения.

Для изготовления несущих элементов конструкций РЭС (рамы, элементы корпусов и т.д.) используются тонколистовые стали, алюминиевые, магниевые и титановые сплавы. Обычно используют прокат толщиной до 2 мм в виде листов, лент, гнутых профилей из углеродистой стали 10кп, алюминиевых сплавов АМц, Д16, В-95, АЛ2. Используются также магниевые сплавы МА2-1, МА-8, титановые сплавы ОТ4 и ВТ1-0. Сталь 10кп (углеродистая, качественная, высокой пластичности) хорошо сваривается и деформируется в холодном состоянии. Применяется в случаях, когда при изготовлении деталей необходимы значительные пластические деформации (гиб, высадка, холодная штамповка, отбортовка и т.д.) [9].

Наиболее высокопластичный из алюминиевых сплавов – алюминий-марганцевый сплав АМц, обладающий повышенной коррозионной стойкостью. Как и другие алюминиевые сплавы, он в 3 раза легче стали. Алюминиевый сплав Д16 более прочный и более жесткий, чем сплав АМц.

Магниевые сплавы в 1,5 раза легче алюминиевых, и их используют при жестких требованиях к минимизации массы конструкции. Однако по некоторым другим параметрам, в том числе по коррозионной стойкости и стоимости, они уступают алюминиевым.

Титановые сплавы, обладающие высокой прочностью и твердостью, сравнимой с твердостью стали, коррозионно-стойки и почти в 2 раза легче стали. Однако они являются труднообрабатываемыми (быстрый износ штампов) и их стоимость в несколько раз выше стоимости стали.

Для изготовления магнитопроводов трансформаторов, дросселей и т.п. используются магнитные материалы: электротехническая сталь (Э310, Э320,

Э330), пермаллой (сплав железа и никеля), карбонильное железо, альсифер, ферриты. Для изготовления отдельных элементов конструкций, например контактных групп переключателей и т.д., используются такие медные сплавы, как латунь Л-63 (медно-цинковый сплав) и бронза Бр.52 (сплав меди и олова). Для изготовления намоточных и монтажных проводов используется медь марки М1.

Из диэлектрических материалов наиболее употребляемыми в конструкциях РЭС являются: гетинакс, текстолит, стеклотекстолит, фторопласт, эбонит, полистирол, керамика, стекло, ситалл и др. Для изготовления печатных плат используется гетинакс фольгированный листовой марки ГФ-1-35 (35 – толщина медной фольги в микронах) с толщиной листа 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 мм и стеклотекстолит фольгированный марок СФ-1 или СФ-2 с толщиной листа 0,8; 1,0; 1,5; 2,0 мм (ГОСТ 10316-78).

### 3.4. Разновидности и особенности разъёмных и неразъёмных соединений

Разъёмные и неразъёмные виды соединений используются при сборке конструкций РЭС и их элементов. Распространённым видом разъёмных соединений является резьбовое, с использованием которого крепятся панели, каркасы, направляющие, переключатели, переменные резисторы, трансформаторы, ручки, электроизмерительные приборы и др. Крепёжные элементы – винты, болты, шпильки, гайки и шайбы.

В условиях крупносерийного и массового производства целесообразно применять автоматическое оборудование, в котором сопряжение собираемых деталей, подача и ориентация крепежа, выполнение соединений осуществляются механизмами в едином технологическом цикле.

Неразъёмные механические соединения выполняются пайкой, сваркой, развальцовкой, заклепками, склеиванием, обжимкой и опрессовкой. Краткая характеристика некоторых неразъёмных соединений приведена ниже.

При *пайке* зазор между соединяемыми элементами заполняется расплавленным припоем без плавления основного материала элементов. Используемые припои – ПОС61, ПОС40 и др. В качестве флюса для предотвращения негативного влияния окисной плёнки используется канифоль и специальные растворы.

Виды *сварки*, применяемые при производстве РЭС, – точечная, роликовая, ультразвуковая и др. Выбранный вид сварки должен помимо необходимых прочностных и эксплуатационных свойств конструкции обеспечить её минимальную деформацию в процессе и после сварки, что зависит от жёсткости конструкции, режима сварки и толщины соединяемых элементов.

*Клеевые* соединения являются технологичными и достаточно прочными. Их использование снижает стоимость изделий и уменьшает их массу.

Достоинства клеевых соединений:

- возможность соединения разнородных материалов;
- возможность получения качественного соединения тонких элементов конструкций;
- герметичность соединения.



Недостатки клеевых соединений:

- низкая теплостойкость;
- меньшая долговечность из-за старения клея;
- сложный контроль качества соединений;
- сильная зависимость прочности клеевого соединения от качества подготовки склеиваемых поверхностей.

*Заклёпочные соединения* используют для деталей из несвариваемых, а также не допускающих нагрева материалов. Эти соединения вытесняются более экономичными – сварными и клеевыми. Материал для заклёпок – пластичные металлы и сплавы (алюминиевые сплавы, стали, латуни и др.).

### 3.5. Технологичность конструкций РЭС

#### 3.5.1. Общие сведения

Технологичность – свойство конструкции, состоящее в её приспособленности для повторения в условиях производства.

Технологичность конструкции во многом определяется удачностью принятых решений на этапе конструкторского проектирования РЭС.

Технологичность проявляется в возможности минимальных затрат труда, средств, материалов и времени на всех этапах производства, изготовления, эксплуатации и ремонта по сравнению с соответствующими показателями для однотипных конструкций.

Для оценки эффективности мер по повышению технологичности вновь разрабатываемой конструкции РЭС проводится технико-экономический анализ, в результате которого устанавливается технико-экономический эффект, обусловленный внедрением новой техники и технологии с учётом дополнительных затрат на проектирование и подготовку производства. Технико-экономический эффект проявляется в виде экономии затрат и удовлетворении каких-либо потребностей людей (например видеозапись, цифровой фотоаппарат и т.д.).

#### 3.5.2. Показатели технологичности

Технологичность конструкции определяется на основе показателей технологичности, которые различаются:

- по области проявления (производственные, эксплуатационные);
- по целям анализа (технические, технико-экономические);
- по системе оценки (базовые, разрабатываемой конструкции);
- по степени значимости (основные, дополнительные) и др.

Некоторые показатели могут иметь разновидности. Так, производственная технологичность конструкции изделия характеризуется конструкторскими и технологическими показателями технологичности. Конструкторские показа-

тели определяют конструктивную преемственность изделия и применяемость новых составных частей, обусловленных его функциональным назначением.

Технологичность конструкции может быть:

- производственной;
- эксплуатационной;
- ремонтной.

Производственная технологичность определяет объём работ по технологической подготовке производства, сложность изготовления, удобство монтажа вне предприятия-изготовителя.

Эксплуатационная технологичность определяет объём работ при подготовке изделия к использованию по назначению, техническому ремонту и утилизации.

Ремонтная технологичность характеризует объём работ при всех видах ремонта, кроме текущего.

### 3.5.3. Методы обеспечения и оценка технологичности

Основными методами обеспечения технологичности являются:

- использование наиболее простой и отработанной в производстве конструкторской иерархии (базовой конструкции);
- выбор прогрессивных способов формообразования деталей;
- уменьшение числа уровней разукрупнения конструкций РЭС и выбор их формы и размеров с учётом унифицированной оснастки и стандартного оборудования;
- уменьшение номенклатуры используемых материалов;
- уменьшение применения дефицитных или токсичных материалов, драгоценных металлов;
- обоснованный выбор качества точности, шероховатости поверхности;
- конструктивная и функциональная взаимозаменяемость узлов, минимизация числа подстроечных и регулировочных элементов;
- контролепригодность и инструментальная доступность элементов, деталей и узлов.

Количественная оценка технологичности конструкций РЭС проводится по системе базовых показателей (табл. 3.1), включающих отработанные и достигнутые при доработке и совершенствовании изделия параметры. По базовым показателям рассчитывается комплексный показатель технологичности

$$K_{\text{тех}} = \frac{\sum_{i=1}^7 \alpha_i K_i}{\sum_{i=1}^7 \alpha_i},$$

где  $\alpha_i$  – коэффициент весовой значимости  $i$ -го показателя.

Расчётное значение  $K_{\text{тех}}$  сравнивается с нормативным  $K_{\text{н}}$ , который для серийного производства узлов РЭС изменяется в пределах (0,5...0,8), для установочной серии – (0,45...0,75) и для опытного образца – (0,4...0,7) [3].

Таблица 3.1

Базовые показатели технологичности

Показатель	Формула расчёта	Значимость $\alpha_i$	Примечания
Коэффициент использования ИМС и микросборок	$K_{\text{ИМС}} = \frac{Z_{\text{ИМС}}}{Z_{\text{ИМС}} + Z_{\text{ЭРЭ}}}$	1,0	$H_{\text{ИМС}}$ – количество ИМС; $Z_{\text{ЭРЭ}}$ – количество других навесных элементов
Коэффициент автоматизации и механизации монтажа	$K_{\text{АМ}} = \frac{H_{\text{АМ}}}{H_{\text{М}}}$	1,0	$H_{\text{М}}$ – общее количество контактных соединений; $H_{\text{АМ}}$ – количество соединений, выполняемых автоматизированным и механизированным способами
Коэффициент механизации подготовки к монтажу	$K_{\text{МП}} = \frac{H_{\text{МП.ЭРЭ}}}{H_{\text{ЭРЭ}}}$	0,8	$H_{\text{МП.ЭРЭ}}$ – количество навесных элементов, подготовливаемых к монтажу механизированным способом; $H_{\text{ЭРЭ}}$ – общее количество навесных элементов
Коэффициент механизации контроля и настройки	$K_{\text{МКН}} = \frac{H_{\text{МКН}}}{H_{\text{КН}}}$	0,5	$H_{\text{КН}}, H_{\text{МКН}}$ – общее и осуществляемое механизированным способом количество операций контроля
Коэффициент повторяемости ЭРЭ	$K_{\text{ПОВ}} = 1 - \frac{H_{\text{Т.ЭРЭ}}}{H_{\text{ЭРЭ}}}$	0,3	$H_{\text{Т.ЭРЭ}}$ – количество типоразмеров ЭРЭ; $H_{\text{ЭРЭ}}$ – общее количество ЭРЭ
Коэффициент применяемости ЭРЭ	$K_{\text{П.ЭРЭ}} = 1 - \frac{H_{\text{Т.ОР.ЭРЭ}}}{H_{\text{Т.ЭРЭ}}}$	0,2	$H_{\text{Т.ОР.ЭРЭ}}$ – количество типоразмеров оригинальных ЭРЭ; $H_{\text{Т.ЭРЭ}}$ – общее количество типоразмеров ЭРЭ
Коэффициент прогрессивности формообразования деталей	$K_{\text{Ф}} = \frac{D_{\text{ПР}}}{D}$	0,1	$D_{\text{ПР}}$ – число деталей, изготавливаемых прогрессивными методами; $D$ – общее число деталей

Разработанное изделие должно иметь комплексный показатель технологичности не ниже нормативного, в этом случае конструкция изделия считается технологичной. Если расчётное значение  $K_{\text{тех}}$  ниже нормативного ( $K_{\text{н}}$ ), то изделие подлежит доработке с целью получения более высокого показателя технологичности.

## 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА

### 4.1. Классификация методов электрических соединений в конструкциях РЭС

Компоновка РЭС осуществляется пространственным размещением компонентов по уровням конструкторской иерархии. Отдельные компоненты РЭС (ЭРЭ, ИМС и др.), элементы конструкторской иерархии должны быть электрически соединены между собой.

*Электрические соединения* – часть конструкции, предназначенная для обеспечения электрически неразрывных связей элементов и составных частей РЭС между собой в соответствии с принципиальной или монтажной схемой. Технологический процесс выполнения электрических соединений называется электромонтажом (монтажом).

На рис. 4.1 представлены конструкторско-технологические методы электромонтажа.

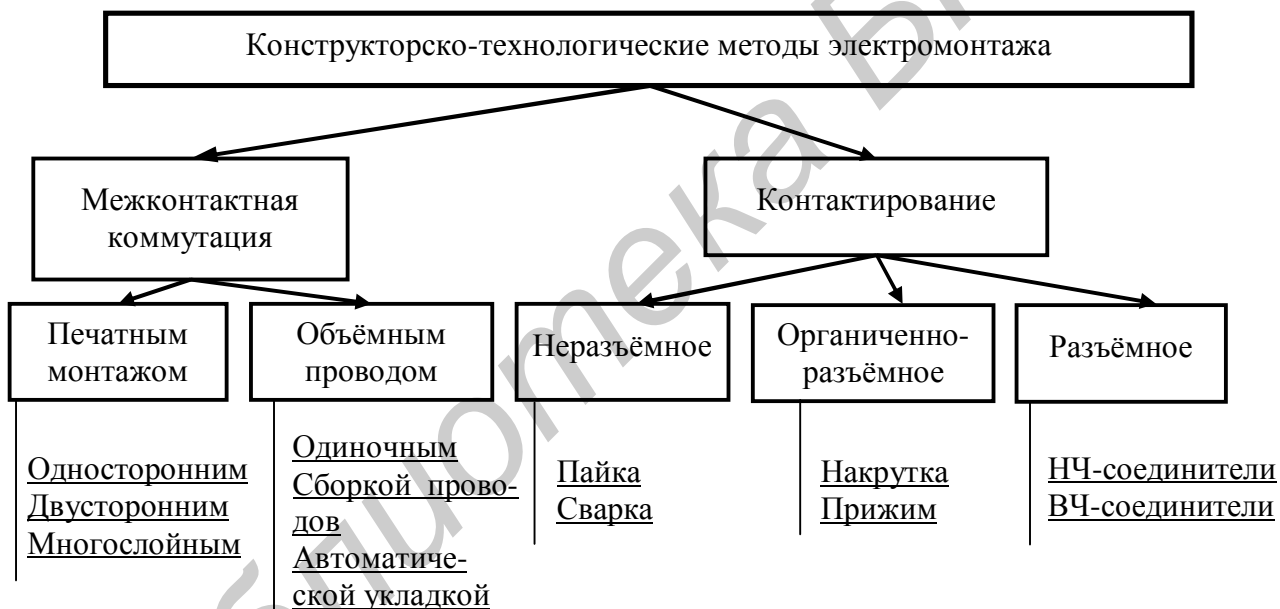


Рис. 4.1. Классификация методов электромонтажа

Качество выполнения электрических соединений и его конструктивное и технологическое исполнение в значительной степени определяют эффективность и качество конструкции всего РЭС. Электрические соединения могут вносить искажения, затухание и задержку непрерывного или дискретного сигнала при распространении в электрической линии связи, а возникающие в ней паразитные связи и помехи могут нарушить нормальное функционирование РЭС.

Трудоёмкость сборочных и электромонтажных работ при производстве РЭС составляет 40...60 % всей трудоёмкости изготовления изделий.

Надёжность РЭС при эксплуатации в значительной степени определяется числом контактов, входящих в электрические соединения, вероятность отказа каждого из которых соответствует примерно вероятности отказа всего микроэлектронного узла на кристалле. Таким образом, чем меньше контактов и контактных групп, тем выше надёжность изделия.

Приведённую на рис. 4.1 классификацию методов электромонтажа можно было бы продолжить, детализируя и далее разновидности вариантов исполнения. Например, печатные платы по виду основания могут быть диэлектрические (стеклопластик, полиимидная плёнка, фторопласт, керамика) и металлические (сталь, алюминий, титан и др.). Есть много разновидностей печатных плат и по технологическому способу получения проводников.

#### 4.2. Основные определения и типы печатных плат

*Печатные платы* (ПП) – основа печатного монтажа любой РЭА, при котором ИМС, полупроводниковые приборы, ЭРЭ и элементы коммутации устанавливаются на изоляционное основание с системой токопроводящих полосок металла (проводников), которыми они электрически соединяются между собой в соответствии с электрической принципиальной схемой.

*Печатный монтаж* – способ монтажа, при котором электрическое соединение элементов электронного узла, включая экраны, выполнено с помощью печатных проводников.

*Печатный проводник* – проводящая полоска в проводящем рисунке.

В РЭА применяют ПП практически на всех уровнях конструктивной иерархии:

- на нулевом – в качестве основания ГИС и микросборок;
- на первом и последующих – в качестве основания, механически и электрически объединяющего все элементы, входящие в электрическую принципиальную схему РЭА.

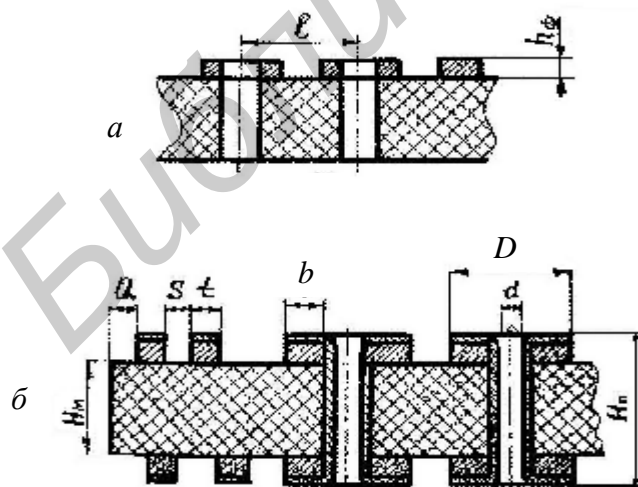


Рис 4.2. Основные типы печатных плат:  
*a* – односторонняя ПП; *б* – двусторонняя ПП

Стандартом предусмотрены следующие типы ПП:

1) односторонняя печатная плата (ОПП) – ПП, на одной стороне которой выполнен проводящий рисунок (рис. 4.2, *a*);

2) двусторонняя печатная плата (ДПП) – ПП, на обеих сторонах которой выполнены проводящие рисунки и все требуемые соединения (рис. 4.2, *б*);

3) многослойная печатная плата (МПП) – ПП, состоящая из чередующихся слоев изоляционного материала с проводящими

рисунками на двух или более слоях, между которыми выполнены требуемые соединения;

4) гибкая печатная плата (ГПП) – ПП, имеющая гибкое основание;

5) гибкий печатный кабель (ГПК) – система параллельных печатных проводников, размещенных на гибком основании.

На рис. 4.2 приведены следующие обозначения:

$t$  – ширина печатного проводника;

$S$  – расстояние между печатными проводниками;

$Q$  – расстояние от края ПП (выреза, паза) до элементов проводящего рисунка;

$b$  – расстояние от края просверленного отверстия до края контактной площадки (поясок);

$D$  – диаметр контактной площадки;

$d$  – диаметр отверстия;

$h_{\text{ф}}$  – толщина фольги;

$H_{\text{м}}$  – толщина материала основания печатной платы;

$H_{\text{п}}$  – толщина ПП;

$l$  – расстояние между центрами (осями) отверстий.

*Проводящий рисунок* – совокупность всех элементов на отдельном слое ПП, образованных проводящим материалом (печатные проводники, контактные площадки, концевые контакты печатного разъёма и др.).

*Перемычка ПП* – отрезок проводникового материала, не входящий в рисунок ПП и обеспечивающий электрическое соединение между двумя точками проводящего рисунка на одной стороне ПП (устанавливается при невозможности выполнить соединение печатным проводником).

*Разновидности отверстий* на печатной плате – монтажные (могут быть металлизированными) и крепежные (для механического крепления ПП на шасси, для крепления разъёмов и т.д.).

Каждое монтажное и переходное отверстие должно быть охвачено контактной площадкой.

### 4.3. Конструктивные характеристики печатных плат

По точности выполнения печатных элементов конструкции (проводников, контактных площадок и пр.) ПП делят на пять классов (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Наименьшие номинальные значения основных размеров элементов печатного монтажа для узкого места в зависимости от класса точности

Условные обозначения элементов печатного монтажа	Класс точности ПП				
	1	2	3	4	5
$t$ , мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
$S$ , мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
$b$ , мм	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025

1-й и 2-й классы ПП применяют в случае малой насыщенности поверхности ПП дискретными элементами и микросхемами малой степени интеграции.

3-й класс ПП используется для микросхем со штыревыми и планарными выводами при средней и высокой насыщенности поверхности ПП элементами.

4-й класс ПП – при высокой насыщенности поверхности ПП микросхемами с выводами и без них.

5-й класс ПП – при очень высокой насыщенности поверхности ПП элементами с выводами и без них.

Ширину печатных проводников рассчитывают и выбирают в зависимости от допустимой токовой нагрузки, свойств токопроводящего материала, температуры окружающей среды при эксплуатации. Края проводников должны быть ровными, проводники – без вздутий, отслоений, разрывов, пор, крупнозернистости и трещин, т. к. эти дефекты влияют на сопротивление и др.

Расстояние между элементами проводящего рисунка (например между проводниками) зависит от допустимого рабочего напряжения, свойств диэлектрика, условий эксплуатации и связана с помехоустойчивостью, искажением сигналов и короткими замыканиями.

Координатная сетка чертежа ПП необходима для координации элементов печатного рисунка (рис. 4.3).

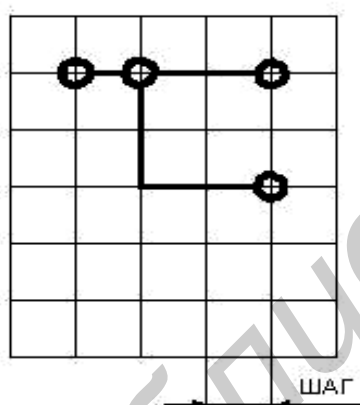


Рис. 4.3. Координатная сетка чертежа печатной платы

В узлах пересечений сетки располагаются монтажные и переходные отверстия. Основным шагом координатной сетки принят размер 0,5 мм в обоих направлениях. Если этот шаг не удовлетворяет требованиям конкретной конструкции, можно применять шаг, равный 0,05 мм. При использовании ИМС и элементов с шагом выводов 0,625 мм допускается применение шага координатной сетки 0,625 мм. В случае необходимости применения координатной сетки с шагом, отличным от основных, предпочтительным является шаг, кратный основным шагам координатной сетки. При использовании микросхем зарубежного производства с расстояниями между выводами по дюймовой системе допускается использование шага координатной сетки, кратного 2,54 мм.

Диаметры монтажных и переходных отверстий должны соответствовать ГОСТ 10317–79 и выбираться из ряда

0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 2,0; 2,1; 2,2; 2,3; 2,4; 2,5; 2,6; 2,7; 2,8; 3,0 мм.

Монтажные отверстия предназначены для установки МС и ЭРЭ, а переходные отверстия – для электрической связи между слоями или сторонами ПП.

Размеры ПП, если они специально не оговорены в ТЗ, определяются с учётом количества устанавливаемых элементов, их установочных площадей,

шага установки, зон установки разъёма и пр. Линейные размеры ПП рекомендуется выбирать по ГОСТу (табл. 4.2). Соотношение линейных размеров сторон ПП должно составлять не более 3:1.

Таблица 4.2

Линейные размеры печатных плат

Ширина, мм	Длина, мм	Ширина, мм	Длина, мм
20	30	90	90
	40		120
30	40		150
40	60		170
45	75	100	120
	80		130
50	60	110	150
	80		170
	100	120	140
	150		150
60	60	120	160
	80		170
	90		180
	100		200
	140	130	200
	160		150
75	75	140	200
	90		150
	170	160	
80	130	160	170, 200
			170
	140	200	

#### 4.4. Электрические характеристики печатных плат

Допустимая плотность тока для ОПП, ДПП и наружных слоев МПП – 20 А/мм<sup>2</sup>, для внутренних слоев МПП – 15 А/мм<sup>2</sup>.

Допустимое рабочее напряжение между элементами проводящего рисунка, расположенными в соседних слоях ПП и ГПК, зависит от материала основания ПП и не должно превышать значений, приведённых в табл. 4.3.

Допустимые рабочие напряжения между элементами проводящего рисунка, расположенными на наружном слое ПП, зависят от материала основания ПП, условий эксплуатации и не должны превышать значений, указанных в табл. 4.4.



Таблица 4.3

## Допустимые рабочие напряжения для материалов ПП

Расстояние между элементами рисунка, мм	Значение рабочего напряжения, В	
	Гетинакс фольгированный (ГФ)	Стеклотекстолит фольгированный (СФ)
От 0,1 до 0,2 включительно	–	25
Свыше 0,2 до 0,3 включительно	–	50
Свыше 0,3 до 0,4 включительно	75	100
Свыше 0,4 до 0,5 включительно	150	200
Свыше 0,5 до 0,75 включительно	250	350
Свыше 0,75 до 1,5 включительно	350	500
Свыше 1,5 до 2,5 включительно	500	650

Таблица 4.4

## Допустимые рабочие напряжения между элементами проводящего рисунка на наружных слоях ПП

Расстояния между элементами проводящего рисунка, мм	Значения рабочего напряжения, В							
	Нормальные условия		Относительная влажность 93 % при 40 °С		Пониженное атмосферное давление			
					53600 Па (400 мм рт. ст.)		666 Па (5 мм рт. ст.)	
	ГФ	СФ	ГФ	СФ	ГФ	СФ	ГФ	СФ
0,1–0,2	-	25	-	15	-	20	-	10
0,2–0,3	30	50	20	30	25	40	20	30
0,3–0,4	100	150	50	100	80	110	30	50
0,4–0,7	150	300	100	200	110	160	58	80
0,7–1,2	300	400	230	300	160	200	80	100
1,2–2,0	400	600	300	360	200	300	100	130
2,0–3,5	500	830	360	430	250	400	110	160
3,5–5,0	660	1160	500	600	330	560	150	210
5,0–7,5	1000	1500	660	830	500	660	200	250
7,5–10	1300	2000	830	1160	560	1000	230	300
10,0–15,0	1800	2300	1160	1600	660	1160	300	330

## 4.5. Рельефные печатные платы

В РЭС для подвижных объектов получают распространение рельефные печатные платы (РП), получившие свое название из-за рельефной формы проводников, имеющих в сечении форму трапеции (рис. 4.4, а) и формируемых в объёме изоляционного основания платы.

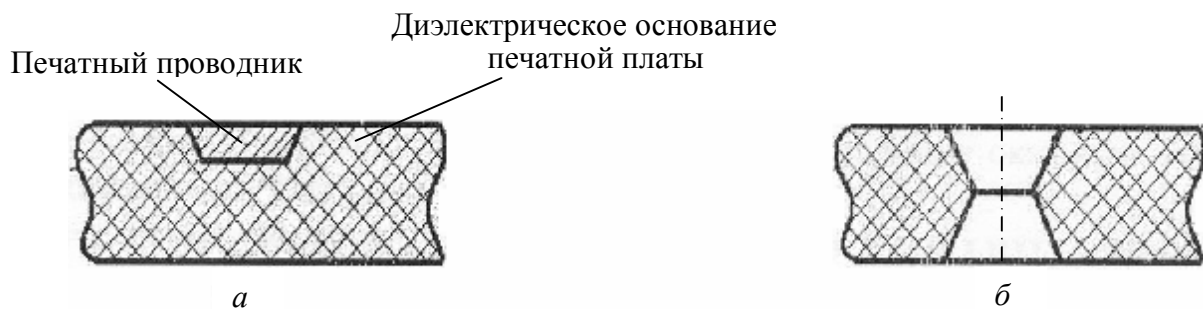


Рис 4.4. Элементы рельефной платы:  
*a* – печатный проводник; *б* – отверстие

Такая конструкция печатного проводника существенно повышает надёжность плат в эксплуатации и стойкость к перепайкам (до 50 перепаяек) за счёт высокой прочности сцепления слоя меди с основанием. В таких платах металлизированные монтажные отверстия имеют форму сдвоенной воронки без цилиндрической части (рис 4.4, *б*), что позволяет отказаться от контактных площадок.

Дорожки РП в 2–3 раза меньше по ширине по сравнению с обычным печатным проводником при одном том же сечении по меди. Отсутствие контактных площадок и малая ширина проводников позволяют изготавливать рельефные двусторонние платы (РДП) повышенной плотности монтажа, эквивалентные 5–14-слойным МПП, и размещать четыре проводника между отверстиями диаметром 0,8 мм и межцентровым расстоянием 2,5 мм.

Ортогональное расположение проводников на сторонах ДПП позволяет формировать переходные отверстия в любой точке пересечения трасс, что укорачивает электрические связи, снижает уровень помех и паразитные связи. Проектирование таких плат осуществляют с помощью САПР на базе пакетов прикладных программ САПР «RELEF» и др. [3].

Достоинства РП:

- возможность осуществления сверхвысокой плотности монтажа ИМС и ЭРЭ;
- высокий класс точности (4 или 5);
- возможность использования технологии поверхностного монтажа;
- сравнительно низкая трудоёмкость проектирования за счёт применения простого алгоритма трассировки;
- высокая эксплуатационная надёжность;
- более низкая стоимость лучших по параметрам, чем стеклотекстолит, полимерных материалов основания (например эпоксидная пластмасса);
- отсутствие экологически вредных технологических процессов нанесения рисунка и др.

#### 4.6. Материалы оснований печатных плат

В качестве материалов оснований ПП используют:

- керамику;

- фольгированные и нефольгированные диэлектрики (гетинакс, текстолит, стеклотекстолит, стеклоткань, лавсан, полиимид, фторопласт и др.);
- металлические пластины.

При выборе материала основания ПП обращают внимание на следующие обстоятельства:

- предполагаемые МВ (вибрации, удары и т.д.);
- класс точности ПП (расстояние между проводниками);
- условия эксплуатации;
- стоимость и др.

Выбор материала основания ПП рекомендуется осуществлять в соответствии с ОСТ 4.010.022–85, РД 50-708–91.

Некоторые марки материалов, используемые в качестве оснований одно- и двусторонних печатных плат, приводятся в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Некоторые материалы основания для ОПП и ДПП

Материал	Марка	Толщина, мм
ГФ	ГФ-1-35	1,0;
ГФ с гальваностойкой фольгой	ГФ-1-35Г	1,5;
	ГФ-2-35Г	2,0;
	ГФ-1-50Г	2,5;
	ГФ-2-50Г	3,0
СФ	СФ-1-35	0,5; 1,0;
СФ с гальваностойкой фольгой	СФ-2-35	1,5; 2,0;
	СФ-1-50	2,5; 3,0
	СФ-2-50	
Стеклотекстолит теплостойкий фольгированный с гальваностойкой фольгой	СТФ-1-35	0,08; 0,1;
	СТФ-2-35	0,13; 0,15;
	СТФ-1-18	0,2; 0,25;
	СТФ-2-18	0,3; 0,35;
		0,5; 0,8;
		1; 1,5; 2; 2,5; 3

Диэлектрическое основание платы представляет собой обычно бумажную (гетинаксы) или текстильную (текстолиты) основу, пропитанную фенольной либо эпоксидной смолой.

Преимущество гетинаксов в том, что они легко поддаются механической обработке, что важно при серийном и массовом производстве РЭС. Их недостаток – повышенная чувствительность к влажности и нестабильность размеров (прогибы и др.).

В стеклотекстолитах в качестве основы используют стеклоткань, пропитанную эпоксидной смолой. Этот материал более качественный, чем гетинакс, но более дорогой и труднообрабатываемый (быстро затупляет острые кромки инструментов – сверла и т.д.).

Фольгированные диэлектрики – электроизоляционные основания, плакированные (покрытые) обычно медной фольгой с оксидированным гальваностойким слоем, прилегающим к электроизоляционному основанию. Они могут быть односторонними и двусторонними.

Нефольгированные диэлектрики, предназначенные для аддитивного метода производства плат, имеют на поверхности специально нанесенный адгезивный слой, который служит для лучшего сцепления химически осаждаемой меди с диэлектриком.

По сравнению с гетинаксами стеклотекстолиты имеют лучшие механические и электрические характеристики, более высокую нагревостойкость, меньшее влагопоглощение. Недостатки стеклотекстолитов – худшая механическая обрабатываемость, более высокая стоимость, существенное различие (приблизительно в 10 раз) коэффициента теплового расширения меди и стеклотекстолита в направлении толщины материала, что может привести к разрыву металлизации в отверстиях при пайке или в процессе эксплуатации.

В качестве материалов основания для МПП также используют различные диэлектрические материалы – стеклотекстолит, полиимид, стеклоткань прокладочную и др.

Для изготовления ГПП и ГПК используют фольгированный лавсан, фторопласт, полиимид и др. ДПП на металлическом основании с нанесенным на него электроизоляционным покрытием применяются, когда нужно обеспечить отвод тепла при размещении на плате тепловыделяющих ЭРЭ, полупроводниковых приборов и ИМС большой мощности. Их другое достоинство – большая механическая прочность.

При повышенных требованиях к стабильности параметров используют керамические платы. На поверхность таких плат наносят проводящие и резистивные пасты и вжигают их при температуре  $t = 600...700\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.7. Печатный монтаж и методы его получения

Печатный монтаж может быть реализован на различных материалах и различными техническими способами (рис. 4.5).

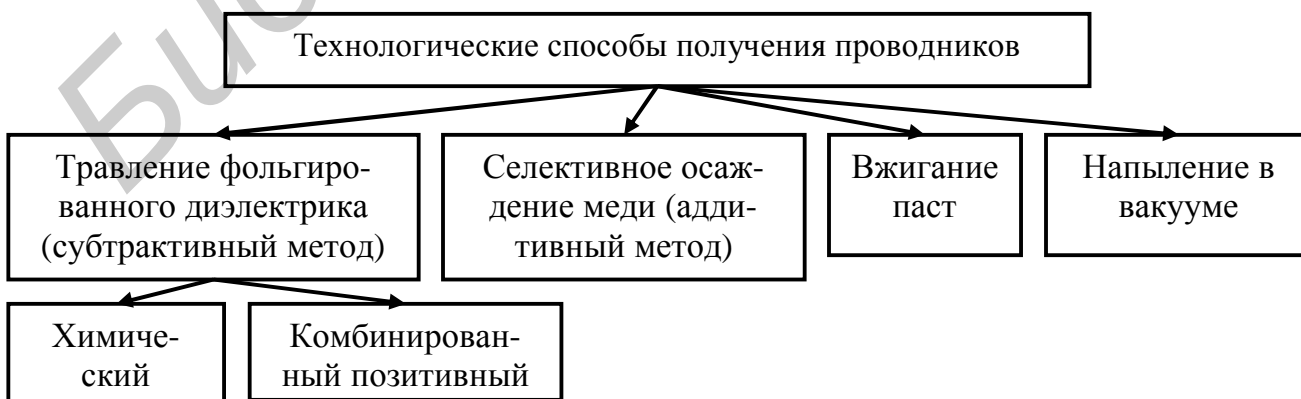


Рис. 4.5. Способы получения проводников

Из субтрактивных методов наибольшее применение нашли химический негативный и комбинированный позитивный.

Первый используется для получения односторонних печатных плат, внутренних слоев многослойных печатных плат и гибких печатных шлейфов. Его достоинство – высокая точность геометрии проводников из-за отсутствия процессов гальванического осаждения меди.

Вторым методом получают двусторонние печатные платы (ДПП) и многослойные печатные платы (МПП) из фольгированного травящегося диэлектрика. Способность диэлектрика к подтравливанию особенно важна для МПП, где от этого зависит надёжность межслойных соединений. ДПП выполняются без использования травящегося диэлектрика.

Рассмотрим в качестве примера последовательность основных операций изготовления ПП химическим негативным методом (рис. 4.6).

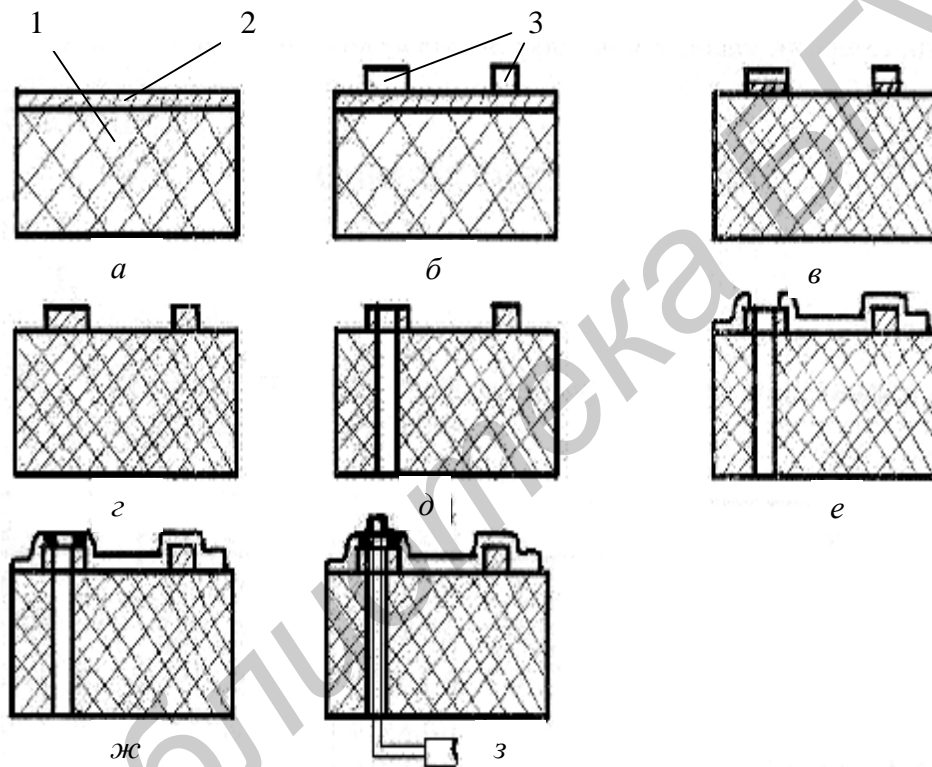


Рис. 4.6. Основные операции изготовления печатных плат химическим негативным методом:

- a* – заготовка из фольгированного диэлектрика; *б* – нанесение фоторезистивного печатного рисунка; *в* – травление печатного рисунка; *г* – удаление фоторезиста; *д* – механическая обработка монтажных отверстий; *е* – нанесение лаковой (эпоксидной) маски; *ж* – облуживание контактных площадок; *з* – пайка выводов ЭРЭ и других элементов;
- 1 – диэлектрическое основание печатной платы; 2 – медная фольга; 3 – фоторезист

Технология формирования печатного рисунка обычно осуществляется с использованием процесса фотолитографии и веществ, обладающих специальными свойствами – фоторезистов.

Фоторезисты – вещества, устойчивые к агрессивному воздействию кислот и щелочей, предназначенные для защиты отдельных участков фольги печатной платы и изменяющие свои свойства под воздействием ультрафиолетового излучения. Технологический процесс получения контактной маски на поверхности печатной платы с помощью фоторезиста называется *фотолитографией*.

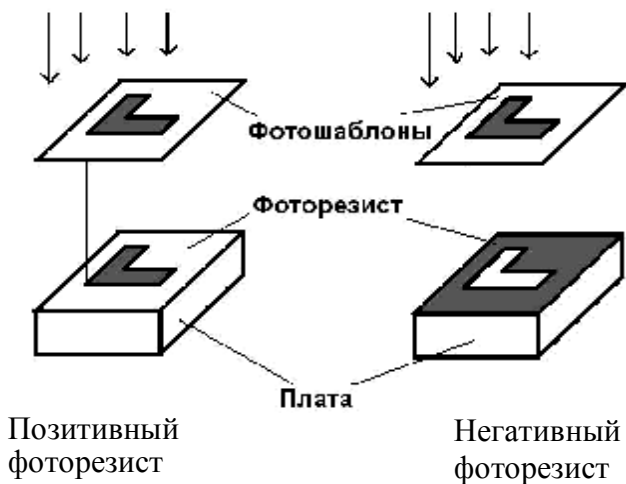


Рис. 4.7. Формирование фоторезистивной маски

В зависимости от механизма протекающих в фоторезисте реакций фоторезисты бывают позитивные и негативные. При облучении негативного фоторезиста через фотошаблон в нем протекают реакции, приводящие к потере фоторезистом растворимости. После обработки в соответствующих растворителях на плате остается рисунок печатной платы, негативный по отношению к фотошаблону (рис. 4.7).

#### 4.8. Односторонние, двусторонние и многослойные печатные платы

В табл. 4.6 показаны сечения одно- (ОПП) и двусторонние (ДПП) печатных плат.

Таблица 4.6

Схемы сечений ОПП и ДПП

Тип платы	Вид платы	Схема сечения печатной платы	Обозначения
ОПП	Без металлизации отверстий		1 – диэлектрическое основание 2 – проводящий рисунок
	С металлизацией отверстий		3 – отверстие 4 – металлизация отверстия
ДПП	На диэлектрическом основании		1 – основание 2 – проводящий рисунок 3 – отверстие 4 – контактная площадка
	На металлическом основании		5 – электроизоляционное покрытие

ОПП содержат один слой проводящего рисунка и имеют следующие достоинства:

- высокая точность выполнения проводящего рисунка;
- отверстия можно использовать и без металлизации;
- возможность установки ЭРЭ, ПП и ИМС на поверхность платы без дополнительного изоляционного покрытия;
- относительно низкая стоимость.

ДПП требует металлизации монтажных и переходных отверстий, что усложняет технологию изготовления (два этапа меднения – химическое, а затем и гальваническое).

Для металлизации отверстий могут быть использованы пистоны с последующей их зенковкой.

Печатные платы с металлизированными отверстиями более надёжны в эксплуатации, так как обеспечивается лучшее сцепление навесных ИМС и ЭРЭ с печатными проводниками и с основанием платы.

ДПП на металлическом основании с нанесённым на него электроизоляционным покрытием применяются, когда нужно обеспечить отвод тепла при размещении на плате тепловыделяющих ЭРЭ и полупроводниковых приборов большой мощности.

МПП имеют много разновидностей. Например, МПП со сквозными металлизированными отверстиями представляют собой чередование проводящих и склеивающих диэлектрических слоев. Применяются для установки элементов как с планарными, так и со штыревыми выводами. Они обеспечивают более плотный монтаж.

#### **4.9. Методы конструирования печатных плат**

Конструирование печатных плат осуществляют ручным, полуавтоматизированным и автоматизированным методами.

При *ручном методе* конструирования размещение элементов на печатной плате и трассировку печатных проводников осуществляет непосредственно конструктор. При использовании данного метода рекомендуется следующий порядок организации работы. Принципиальная электрическая схема разбивается на функционально связанные группы, и производится размещение навесных элементов в каждой группе. Группа элементов, имеющая наибольшее количество внешних связей, размещается вблизи соединителя (разъёма). Группа элементов, имеющая наибольшее количество связей с уже размещённой группой навесных элементов, размещается рядом и т. д. При необходимости производится корректировка в размещении отдельных навесных элементов или допустимая замена адресов связей.

При размещении элементов на поверхности печатной платы в ряде случаев необходимо учитывать ещё ряд ограничений:

- размещение массивных элементов на поверхности платы при предполагаемой эксплуатации изделия в условиях механических воздействий;
- взаимное размещение тепловыделяющих элементов и элементов, параметры которых могут изменяться при изменении температуры в широком диапазоне;
- взаимное размещение элементов для предотвращения возникновения паразитной связи между ними и т.д.

Все эти обстоятельства должны учитываться конструктором на возможно ранней стадии проектирования для исключения переделок при наладке или испытаниях изделия.

*Полуавтоматизированный метод* конструирования предусматривает, например, размещение навесных элементов с помощью ЭВМ при ручной трассировке печатных проводников. Метод обеспечивает ускорение процесса проектирования.

*Автоматизированный метод* конструирования предусматривает кодирование исходных данных, размещение навесных элементов и трассировку печатных проводников с использованием ЭВМ.

Проектирование топологии проводящего рисунка печатной платы выполняется средствами интегрированной САПР PCAD или Altium Designer. Результатом этого этапа является интегральный образ печатной платы, который может непосредственно использоваться в «бесбумажном» производстве узла, но как конструктивный документ не соответствует требованиям ЕСКД.

Довести результат проектирования до состояния конструкторского документа можно, выполнив следующую стадию проекта. Переход к этой стадии требует конверсии данных из формата «электронной» САПР PCAD или Altium Designer в формат «конструкторской» САПР AutoCAD или разработанной в России системы КОМПАС. Конвертированный образ печатного узла подвергается обработке, в результате которой создаются рабочие конструкторские документы в соответствии с требованиями ЕСКД [1].

#### **4.10. Последовательность процесса конструирования печатных плат**

Рекомендуется следующий порядок конструирования плат:

- изучение технического задания на изделие, в состав которого входит печатная плата;
- определение условий эксплуатации и группы жёсткости;
- выбор типа и класса точности;
- выбор размеров и конфигурации;
- выбор материала основания;
- выбор конструктивного покрытия;
- размещение навесных элементов и трассировка печатных проводников;
- выбор метода маркировки и её расположения;
- разработка конструкторской документации.



Условия эксплуатации, хранения и транспортирования определяют на основании требований ТЗ на изделие, в состав которого входит печатная плата.

В зависимости от условий эксплуатации по ГОСТ 23752-79 определяют группу жёсткости, предъявляющую соответствующие требования к конструкции печатной платы, к используемому материалу основания и необходимости применения дополнительной защиты от климатических, механических и других видов воздействий. Найденную информацию записывают в технических требованиях на поле чертежа печатной платы.

#### 4.11. Конструктивные покрытия

Конструкторские покрытия необходимы для обеспечения стабильности электрических, механических и других параметров ПП. Покрытия могут быть металлические и неметаллические (табл. 4.7).

Таблица 4.7

Металлические покрытия печатных плат

Материал покрытия	Толщина, мкм	Назначение покрытия
Сплав Розе	1,5...3	Защита от коррозии, обеспечение паяемости
Сплав олово–свинец	9...15	Защита от коррозии, обеспечение паяемости
Серебро	6...12	Улучшение электрической проводимости
Золото и его сплавы	0,5...3,0	Улучшение электрической проводимости, снижение переходного сопротивления, повышение износоустойчивости
Палладий	1...1,5	Снижение переходного сопротивления, повышение износоустойчивости контактов переключателей
Никель	3...6	Защита от коррозии, повышение износоустойчивости контактов переключателей
Медь	25...30	Обеспечение электрических параметров соединения

Неметаллические конструктивные покрытия используются для защиты:

- печатных проводников и поверхности основания печатной платы от воздействия припоя;
- элементов проводящего рисунка от замыкания навесными элементами;
- от влаги при эксплуатации.

Используемые диэлектрические покрытия: эпоксидные смолы, эмали, оксидные плёнки.

#### 4.12. Выбор и размещение отверстий

Количество типоразмеров любых отверстий на печатной плате следует ограничивать. Рекомендуется применять не более трёх типоразмеров монтажных и переходных отверстий.

Центры отверстий располагают в узлах координатной сетки. Основным шагом координатной сетки принят размер 0,5 мм. Центры монтажных отверстий под неформуемые выводы многовыводных элементов, межцентровые рас-

стояния которых не кратны шагу координатной сетки, следует располагать так, чтобы в узле координатной сетки находился центр по крайней мере одного из монтажных отверстий, а центры отверстий под остальные выводы располагались в соответствии с требованиями конструкций устанавливаемых элементов с указанием необходимых размеров (рис. 4.8).

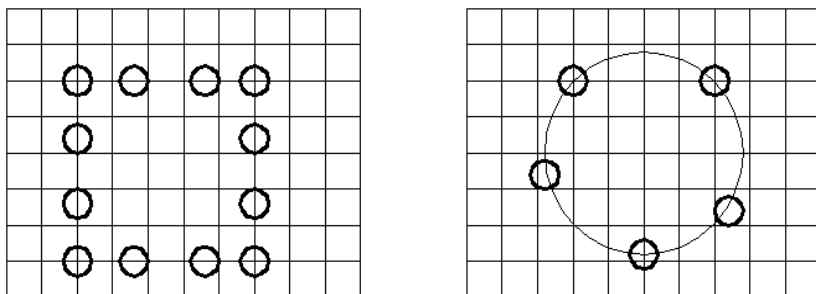


Рис. 4.8. Расположение центров отверстий на координатной сетке ПП

навесного элемента.

Слой металла на поверхности печатной платы, сформированный в определенном месте, может выполнять функцию экрана между элементами устройства. Этот слой металла может занимать большую площадь платы, и при групповой пайке, например волной припоя, возможно газовыделение из диэлектрика и отслаивание слоя металлизации. Чтобы исключить этот негативный эффект, экраны выполняют с вырезами, равномерно распределенными по площади экрана (рис. 4.9). Обычно площадь вырезов должна составлять не менее 50 % от общей площади экрана.

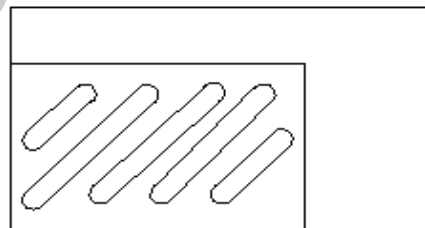


Рис. 4.9. Печатный экран с вырезами

### 4.13. Маркировка печатных плат

Маркировка, наносимая на печатную плату, подразделяется на основную и дополнительную. Основная маркировка наносится обязательно и должна содержать:

- обозначение печатной платы или её условный шифр;
- порядковый номер изменения чертежа, относящийся только к изменению проводящего рисунка;
- буквенно-цифровые обозначение в слоях МПП.

Дополнительная маркировка наносится при необходимости и может содержать:

- порядковый или заводской номер ПП или партии ПП;
- позиционное обозначение навесных элементов;
- цифровое обозначение первого вывода навесного элемента, точек контроля;
- обозначение положительного вывода полярного элемента (знак «+»).

Основная маркировка может выполняться способом, которым выполняется проводящий рисунок.

Дополнительная маркировка обычно выполняется краской.

#### 4.14. Межконтактные соединения из объёмного провода

Электрические соединения из объёмного провода обладают худшими массогабаритными и экономическими показателями по сравнению с печатным монтажом. Однако они широко используются в опытном производстве для выполнения навесных электрических соединений в ИС (для соединения контактных площадок ИС с внешними выводами), осуществления длинных или высокочастотных связей и т.д.

Номенклатура объёмных проводов:

- одножильные без изоляции (золотые, алюминиевые, медные, медные луженые);
- одножильные и многожильные с изоляцией (волоконистой, пластмассовой, резиновой, лаковой);
- экранированные;
- коаксиальные кабели;
- многожильные кабели (опрессованные, тканые, клееные, собранные и увязанные в круглый жгут).

Провода без изоляции используют в основном для электрических соединений ИС и микросборок.

Золотая проволока хорошо поддается пайке и сварке, совместима практически со всеми материалами контактных площадок.

Провода из алюминия и его сплавов более дешевы, совместимы с алюминиевыми контактными площадками, но менее прочны в зоне контакта.

Для золотых проводов используется в основном термокомпрессионная сварка, а для алюминиевых – ультразвуковая.

Провода с изоляцией используют для реализации электрических соединений в пределах платы, блока, шкафа наряду с печатным монтажом.

В ряде случаев монтаж объёмными проводниками экономичнее, чем с помощью печатных плат (например, если плата большая и насыщенная, а монтаж объёмным проводом выполняется автоматизированным методом). Электрические соединения объёмным проводом позволяют вносить изменения и облегчают ремонт, но затрудняют воспроизводимость параметров электрических связей (волнового сопротивления, паразитных параметров). Провода могут быть одножильные и многожильные. В первом случае контакт осуществляется накруткой (рис. 4.10), во втором – пайкой.

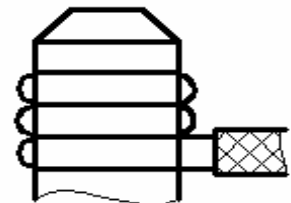


Рис. 4.10. Монтаж накруткой пайкой.

Для осуществления такого монтажа используют изолированные провода с медной посеребренной жилой диаметром 0,16...0,5 мм. При ручной работе производительность монтажа составляет до 174 соединений/ч, при автоматической – до 1000 соединений/ч.

Недостатком метода является большой объем контактного узла (необходимо 4–6 витков на одном штыре), что также ухудшает частотные характеристики узла. Контактные штыри располагают с шагом 2,5 и 1,25 мм. Минимальное сечение штырей 0,3 x 0,3 мм.

При монтаже РЭС также широко используются плоские кабели. Они обладают высокой стабильностью электрических параметров, хорошим теплоотводом. Разновидности плоских кабелей (рис. 4.11): клееные (а), опрессованные (б), плетёные (в).

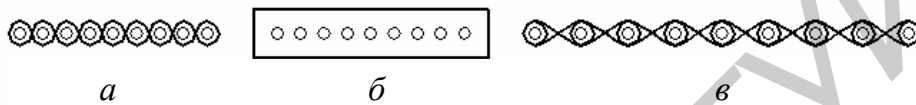


Рис. 4.11. Плоские кабели

## 5. КОМПОНОВКА РЭС

### 5.1. Задачи компоновки

Для ускорения разработки РЭС, повышения надёжности и качества аппаратуры разрабатывают компоновочные эскизы (чертежи) и определяют численные значения компоновочных характеристик.

Компоновка представляет собой размещение элементов РЭС в пространстве или на плоскости. Задача компоновки – выбор форм, основных геометрических размеров несущих конструкций (печатных плат, корпусов и т.п.), расположение в пространстве, а для печатных плат – на плоскости, элементов и составных частей проектируемого РЭУ, определение его массы и основных компоновочных характеристик.

Имея компоновочный эскиз изделия и электрическую принципиальную схему, можно до разработки рабочих чертежей и изготовления макета РЭС определить возможный характер и уровень паразитных связей, оценить тепловые режимы и т.д.

### 5.2. Оценка компоновочных характеристик РЭУ

Основными конструкторскими параметрами РЭУ, с которыми приходится иметь дело при выполнении компоновочных работ, являются: а) масса; б) габариты; в) полезное использование массы; г) полезное использование объёма; д) полезное использование площади.

Полезное использование объёма описывают с помощью коэффициента заполнения по объёму  $K_V$ , который можно подсчитать по формуле

$$K_V = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{V}, \quad (5.1)$$

где  $n$  – количество элементов в устройстве;

$v_i$  – объём  $i$ -го элемента;

$V$  – общий объём РЭУ (определяется объёмом корпуса).

Теоретически различают коэффициент заполнения по установочным объёмам и коэффициент заполнения по физическим объёмам в зависимости от того, какие объёмы элементов (установочные или физические) подставляются в выражение (5.1).

Физический объём  $i$ -го элемента  $V_{\text{физ } i}$  – это такой объём, который равен объёму вытесненной этим элементом жидкости.

Установочный объём  $V_{\text{уст } i}$  – это объём, необходимый для установки и монтажа элемента в устройстве (рис. 5.1).

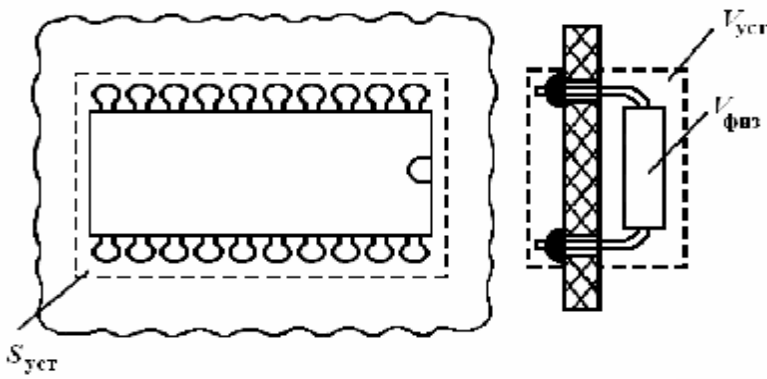


Рис. 5.1. К пояснению физического и установочного объема и площади

Как правило, всегда справедливо соотношение

$$V_{уст\ i} > V_{физ\ i}.$$

В инженерной практике обычно пользуются установочными объемами  $V_{уст\ i}$ . Значения  $V_{уст\ i}$  выбираются из справочной литературы [10], либо могут быть подсчитаны аналитически.

Значения коэффициентов заполнения по объему для некоторых видов РЭУ приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Значения коэффициентов  $K_V$  [10]

Характеристика РЭУ (функциональное назначение)	Категория РЭУ		
	стационарная	возимая	бортовая
1. Радиопередающая	0,2	0,4	0,6...0,7
2. Радиоприемная	0,4	0,5	0,7...0,8
3. РЭУ цифровой обработки информации	0,7	0,7	0,8...0,9
4. Источники питания	0,5	0,6...0,7	до 1,0

По аналогии с коэффициентом заполнения по объему при проектировании пользуются коэффициентом заполнения по массе ( $K_M$ ), а для печатных плат и подобных изделий – коэффициентом заполнения по площади ( $K_S$ ). Эти коэффициенты подсчитывают по формулам

$$K_M = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{M}, \quad (5.2)$$

$$K_S = \frac{\sum_{i=1}^n S_{уст\ i}}{S}, \quad (5.3)$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -го элемента;

$S_{уст\ i}$  – установочная площадь  $i$ -го элемента (см. рис. 5.1);

$M$  – суммарная масса РЭУ;

$S$  – общая площадь платы, на которой устанавливаются элементы;

$n$  – количество элементов в РЭУ.

По значениям коэффициентов заполнения  $K_V$ ,  $K_M$  и  $K_S$  судят о техническом уровне разработки. Обычно считают, чем ближе коэффициент заполнения к единице, тем выше технический уровень разработки, так как в этом случае рациональнее используются материалы конструкции РЭУ. Однако при больших значениях коэффициентов заполнения могут возникнуть проблемы с обеспечением теплового режима и электромагнитной совместимости ввиду высокой плотности упаковки элементами площади печатных плат или объёма РЭУ в целом.

При инженерном проектировании для определения ориентировочного объёма РЭУ или его части вместо коэффициента заполнения по объёму  $K_V$  лучше пользоваться коэффициентом увеличения объёма  $K_{yв}^V$ , представляющим собой величину, обратную коэффициенту  $K_V$ :

$$K_{yв}^V = \frac{1}{K_V}. \quad (5.4)$$

Аналогично, для определения площади печатных плат и ориентировочной оценки массы конструкции РЭУ пользуются соответственно коэффициентами увеличения площади  $K_{yв}^S$  и массы  $K_{yв}^M$ , смысл которых аналогичен коэффициенту  $K_V$ , но применительно к площади и массе.

При выполнении работ по компоновке коэффициенты увеличения выбирают из следующих численных диапазонов [10, 11]:

- а) коэффициент  $K_{yв}^V$  – от 1,2 до 5;
- б) коэффициент  $K_{yв}^S$  – от 1,5 до 3;
- в) коэффициент  $K_{yв}^M$  – от 1,1 до 3... 5.

**Пример.** Требуется определить площадь и размеры печатной платы, необходимые для размещения элементов РЭУ, согласно электрической схеме устройства.

Решение: 1. Пользуясь электрической схемой и принимая во внимание условия эксплуатации и другие данные технического задания на проектирование, выбираем типы и типоразмеры всех  $n$  элементов РЭУ. При инженерном проектировании выбору подлежат лишь пассивные элементы. Активные элементы (ИМС, полупроводниковые приборы и подобные им элементы) определяют выходные электрические характеристики РЭУ и указываются разработчиком электрических схем.

2. По справочным таблицам, например приведённым в [10], находим установочные площади элементов  $s_{уст\ i}$  ( $i = 1, \dots, n$ ). Если данные о каком-то элементе отсутствуют в справочных таблицах, то примерное значение  $s_{уст\ i}$  этого элемента определяется разработчиком путём расчёта. При этом учитывается площадь проекции элемента на горизонтальную поверхность, необходимые за-

зоры между соседними элементами и другие технологические ограничения. Практика показывает, что найденные таким способом, но разными людьми, значения  $s_{уст\ i}$  могут отличаться на  $\pm 20\%$ , что вполне приемлемо для инженерных применений.

3. Подсчитываем значение величины

$$\sum_{i=1}^n s_{уст\ i} .$$

Пусть значение этой величины равно  $60\text{ см}^2$ .

4. Выбираем значение коэффициента увеличения поверхности печатной платы  $K_{ув}^S$ . Согласно приведённым ранее рекомендациям  $K_{ув}^S \in (1,5...3)$ . Конкретные значения  $K_{ув}^S$  принимают с учётом частотного диапазона работы РЭУ, мощности тепловых потерь, выделяемой элементами, требований к габаритам и других факторов. Примем

$$K_{ув}^S = 2.$$

Тогда площадь печатной платы  $S_{пп}$ , необходимая для размещения элементов, определится как

$$S_{пп} = K_{ув}^S \sum_{i=1}^n s_{уст\ i} = 2 \cdot 60 = 120\text{ см}^2.$$

5. Принимая во внимание внутриблочную компоновку, выбираем геометрическую форму (квадрат, прямоугольник или другая форма) и размеры сторон печатной платы, обеспечивающие найденную площадь ( $120\text{ см}^2$ ). Следует помнить, что выбираемые размеры должны отвечать требованиям ГОСТа, регламентирующего размеры печатных плат (см. табл. 4.2). Так, при форме в виде прямоугольника могут быть приняты размеры  $120 \times 100\text{ мм}$ .

### 5.3. Требования к компоновочным решениям

Конструктор должен выбирать компоновочные решения, которые удовлетворяют следующим требованиям:

1) отсутствие между отдельными элементами, узлами и блоками существенных паразитных электрических и магнитных взаимосвязей, влияющих на технические характеристики изделия;

2) минимизация влияния тепловых и механических воздействий на изменение технических характеристик изделия;

3) взаимное расположение элементов конструкции, обеспечивающее технологичность сборки и монтажа с учётом использования автоматического и полуавтоматического оборудования, лёгкий доступ к деталям для контроля, ремонта и обслуживания;



- 4) расположение и конструкция органов управления и настройки, обеспечивающие максимальные удобства для оператора;
- 5) изделия должны удовлетворять требованиям технической эстетики;
- 6) габариты и масса изделия должны быть минимальными.

В отношении последнего требования следует отметить, что габариты и масса изделия в значительной мере зависят от принятых схемных решений и используемых радиоэлементов. Так, например, переход в телевизионных приёмниках от источников электропитания с трансформаторным входом к импульсным источникам электропитания, работающим на повышенных частотах (20–100 кГц вместо 50 Гц), позволил снизить удельные показатели источника электропитания по массе и объёму примерно в два раза. Мерой эффективности мероприятий по уменьшению габаритов аппаратуры является плотность монтажа – среднее количество ЭРЭ, полупроводниковых приборов, умещающихся в единице объёма.

Удовлетворить одновременно всем перечисленным требованиям в большинстве случаев не удастся. Поэтому процесс компоновки, как и всякий процесс конструирования, сводится к нахождению компромиссного оптимального решения. Для компоновки широко используются САПР. Процесс же трассировки печатных плат полностью автоматизирован.

#### 5.4. Способы выполнения компоновочных работ

В практике инженерного проектирования РЭС используются следующие виды компоновки:

- аналитическая;
- номографическая;
- аппликационная;
- модельная;
- графическая;
- натурная;
- с использованием ЭВМ.

При *аналитической* компоновке оперируют численными значениями различных компоновочных характеристик: геометрическими размерами, объёмом, массой. По известным компоновочным характеристикам элементов вычисляют компоновочные характеристики изделия в целом.

При *номографической* компоновке используют специально разработанные номограммы, упрощающие вычисления.

Аналитическая и номографическая компоновки выполняются по перечням элементов принципиальных схем. Они не обладают наглядностью и не дают возможность получить пространственные компоновочные эскизы.

*Аппликационная* компоновка позволяет получить наглядный компоновочный эскиз. Элементы выполняются в виде аппликаций и размещаются на заданной плоскости или в объёме.

При *модельной* компоновке используют упрощённые модели ЭРЭ, полупроводниковых приборов и ИМС, выполненные из бумаги, картона и других материалов, размещаемые затем на плоскости или объёме.

При *графической* компоновке используются упрощённые способы изображения элементов. Для наглядности могут выделяться цветом элементы различных типов.

При *натурной* компоновке используются реальные компоненты изделия. Их размещают на плоскости в необходимом порядке. После достижения удобного расположения элементов места их установки фиксируют и выполняют монтажный и компоновочный эскизы.

Наиболее перспективный способ выполнения компоновки РЭС – с использованием ЭВМ. Проектирование объёмных элементов конструкции модуля РЭС, моделирование их взаимного расположения и взаимодействия при сборке, разборке и в эксплуатации выполняется средствами САПР объёмного художественного конструирования 3D Studio MAX или инженерного пакета SolidWorks.

Результатом такого проектирования является комплект конструкторской документации, файлы управляющей информации для автоматизированного производственного оборудования, а также видеоролик или комплект видов модуля, исполненного в материалах, имеющих нужный цвет, фактуру, освещённого расположенными в окружающем его пространстве источниками света с заданными свойствами [1].

### **5.5. Компоновка РЭУ и рабочего места оператора с учётом требований эргономики**

Удобное рабочее место и удобный инструмент повышают производительность работы оператора. Если наблюдается обратное, то повышается утомляемость человека, растёт число ошибок, возможны отказы аппаратуры по вине оператора и травмы самого оператора.

Установлением взаимосвязи параметров человека и машины (пульта управления) занимается *эргономика* и её раздел – *инженерная психология*. Человек, машина и среда рассматриваются в эргономике как сложное функциональное целое, в котором ведущая роль принадлежит человеку.

Основные факторы, определяющие эффективность деятельности оператора, приведены ниже.

#### **1. Общие факторы:**

- окружающая среда;
- компоновка рабочего места;
- личные качества оператора.

#### **2. Факторы, определяющие время считывания информации:**

- тип индикации (цифровой или стрелочный);
- количество индикаторов;
- размещение индикаторов.

### 3. Факторы, определяющие распознавание:

- читаемость букв, цифр, знаков;
- световые характеристики;
- цветовой тон и цветовые контрасты.

### 4. Факторы, определяющие время работы:

- количество органов управления;
- тип органов управления, удобство размещения;
- совместимость двигательных операций.

### 5. Факторы, определяющие время оценки информации:

- объём информации;
- динамика смены информации.

Для оценки соответствия спроектированной конструкции эргономическим показателям качества используют следующие показатели:

- гигиенические (освещенность, вентилируемость, температура, токсичность, шум, вибрация, напряженность электрического и магнитного полей);
- антропометрические – соответствие конструкции изделия размерам и форме тела человека и его частей (ног и рук), входящих в контакт с изделием;
- физиологические и психофизиологические (соответствие конструкции изделия силовым, скоростным, зрительным возможностям человека);
- психологические (соответствие конструкции изделия возможностям восприятия и переработки информации, закрепленным и вновь формируемым навыкам человека).

Вопросами реализации требований эргономики художественными средствами занимается такая отрасль, как *дизайн* или *техническая эстетика*.

Ниже рассмотрены некоторые принципы организации и компоновки рабочего места оператора с учётом требований эргономики. Рабочее место – зона, оснащённая необходимыми техническими средствами.

Надёжность работы оператора зависит от значений *гигиенических параметров* окружающей среды. Условия, определяемые этими параметрами, в общем случае могут быть комфортными, некомфортными и невыносимыми (табл. 5.2).

Таблица 5.2

Некоторые гигиенические параметры

Параметры (факторы)	Условия		
	комфортные	некомфортные	невыносимые
Температура, °С: тепло холод	+ 22...+ 24 +18...+ 22	+ 35...+ 44 +10...-1	выше + 44 ниже -1
Шум, дБ	40...50 (лаборатория) 80...90 (производственный цех)	100...120	130...135
Влажность, %	20...60	≥ 10...< 20	ниже 10

Между комфортными и некомфортными условиями существует психологическая граница, а между некомфортными и невыносимыми – физиологическая.

Важное значение в организации рабочего места имеет его цветовое оформление. С помощью зрения человек получает 80–90 % всей информации. Цвет ассоциируется у человека с понятием тепла и холода, приближения и отдаления, лёгкости и тяжести (рис. 5.2).

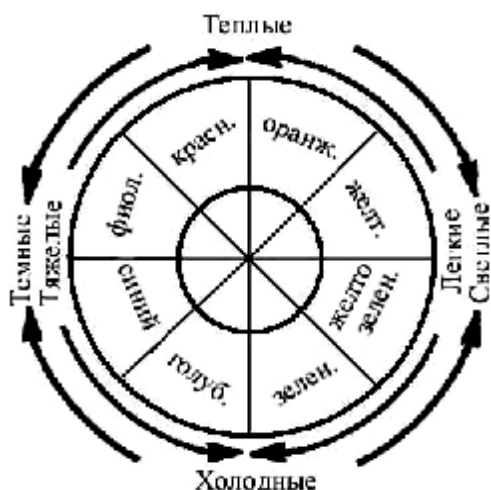


Рис. 5.2. Цветовой круг

Оптимальная яркость фона, при которой отмечается наибольшая разрешающая способность зрения, составляет примерно  $10^4$  кд/м<sup>2</sup>.

Наибольшей разрешающей способностью по цвету отличаются следующие комбинации при восприятии знаков:

- синий на белом;
- чёрный на желтом;
- зеленый на белом;
- чёрный на белом;
- зеленый на красном;
- красный на желтом.

Реакция глаз характеризуется также полем зрения, остротой зрения, аккомодацией и другими параметрами. Рассмотрим в качестве примера поле зрения (рис. 5.3).

Органы управления и индикации должны располагаться в поле зрения обоих глаз. При установке органов управления в паре с индикатором необходимо управляющее устройство располагать так, чтобы руки оператора не заслоняли индикатор, т.е. органы управления должны быть расположены ниже индикатора, связанного с ним, или справа от него.

Лицевые панели, например, измерительных приборов, окрашивают обычно синтетическими эмалями МЛ-12 различных цветов (светло-бежевый, дымчатый, серый, серо-голубой и др.).

Для внешних установочных элементов рекомендуются цвета: серый, белый, черный. Надписи и символы на передних панелях и внешних устройствах выполняют: черным, белым, красным, желтым, зеленым, синим, но рекомендуется использовать не более пяти цветов в одном приборе.

Надписи должны состоять из терминов, утвержденных соответствующим ГОСТом. Выполняются надписи и символы *гравировкой*, *офсетной печатью* или *сеткографией*. Надписи располагаются над элементами или недалеко от них. Заводской номер и год изготовления следует наносить на задней панели в левом верхнем углу.

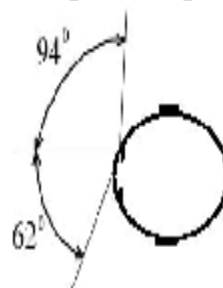


Рис. 5.3. Поле зрения человека по горизонталям

Размещение органов управления и индикации должно производиться по следующим правилам:

- функциям;
- важности;
- удобству пользования;
- последовательности пользования;
- частоте пользования.

При компоновке панели соблюдают следующие правила:

- зрительный обзор панели должен создаваться основными функционально-конструктивными элементами, не должно быть лишних элементов, надписей, линий и др.;
- композиционная упорядоченность требует размещать внешние установочные изделия по четкой системе перпендикуляров и параллелей;
- органы управления и индикаторы должны быть расположены соответственно последовательности пользования: слева направо при расположении в одну линию по горизонтали и сверху вниз при размещении в одну линию по вертикали.

### **5.6. Проектирование лицевых панелей**

Компоновку лицевой панели следует начинать с анализа работы оператора с радиоэлектронным устройством (аппаратом, прибором). Для этого графически изображают все элементы панели и устанавливают взаимосвязь между ними и оператором.

Рабочие операции необходимо распределить между правой и левой рукой оператора. Для правой руки выделить органы управления, связанные с наиболее ответственными и точными операциями. Количество и траектории рабочих движений должны быть сокращены до минимума.

При размещении внешних установочных изделий следует руководствоваться следующим общим правилом: органы индикации располагают вверху, органы управления – в средней части, а органы подключения – внизу лицевой панели.

Наружные размеры конструкций, а также расстояния между установочными изделиями аппаратов и приборов (кнопками, тумблерами, ручками настройки) должны обеспечивать удобство осуществления переключений и настройки.

## 6. ЗАЩИТА КОНСТРУКЦИЙ РЭС ОТ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

### 6.1. Классификация дестабилизирующих факторов

РЭС эксплуатируются в помещениях, на открытом воздухе, на различных подвижных объектах и т.д. При эксплуатации они подвергаются воздействиям внешних и внутренних дестабилизирующих факторов (рис. 6.1).

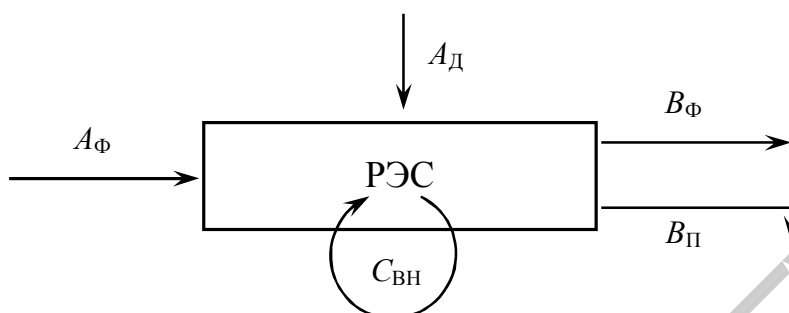


Рис. 6.1. РЭС при воздействии внешних и внутренних дестабилизирующих факторов:  $A_{\Phi}$  – функционально обусловленное входное воздействие (входной сигнал);  $A_{\text{д}}$  – внешнее дестабилизирующее воздействие;  $B_{\Phi}$  – функционально обусловленный выходной сигнал;  $B_{\text{п}}$  – паразитное выходное воздействие (температура, шум и т.д.);  $C_{\text{вн}}$  – паразитное внутреннее воздействие РЭС на его же элементы

Классификация дестабилизирующих факторов, воздействующих на аппаратуру при различных условиях эксплуатации и на различных объектах, представлена на рис 6.2.



Рис. 6.2. Классификация дестабилизирующих факторов

## 6.2. Механические воздействия

### 6.2.1. Общие сведения

Наиболее употребительной является следующая классификация механических воздействий:

- вибрации;
- удары;
- линейные нагрузки;
- акустические шумы;
- комплексные воздействия.

Вибрации в свою очередь могут быть гармоническими, негармоническими, периодическими, случайными (рис. 6.3).

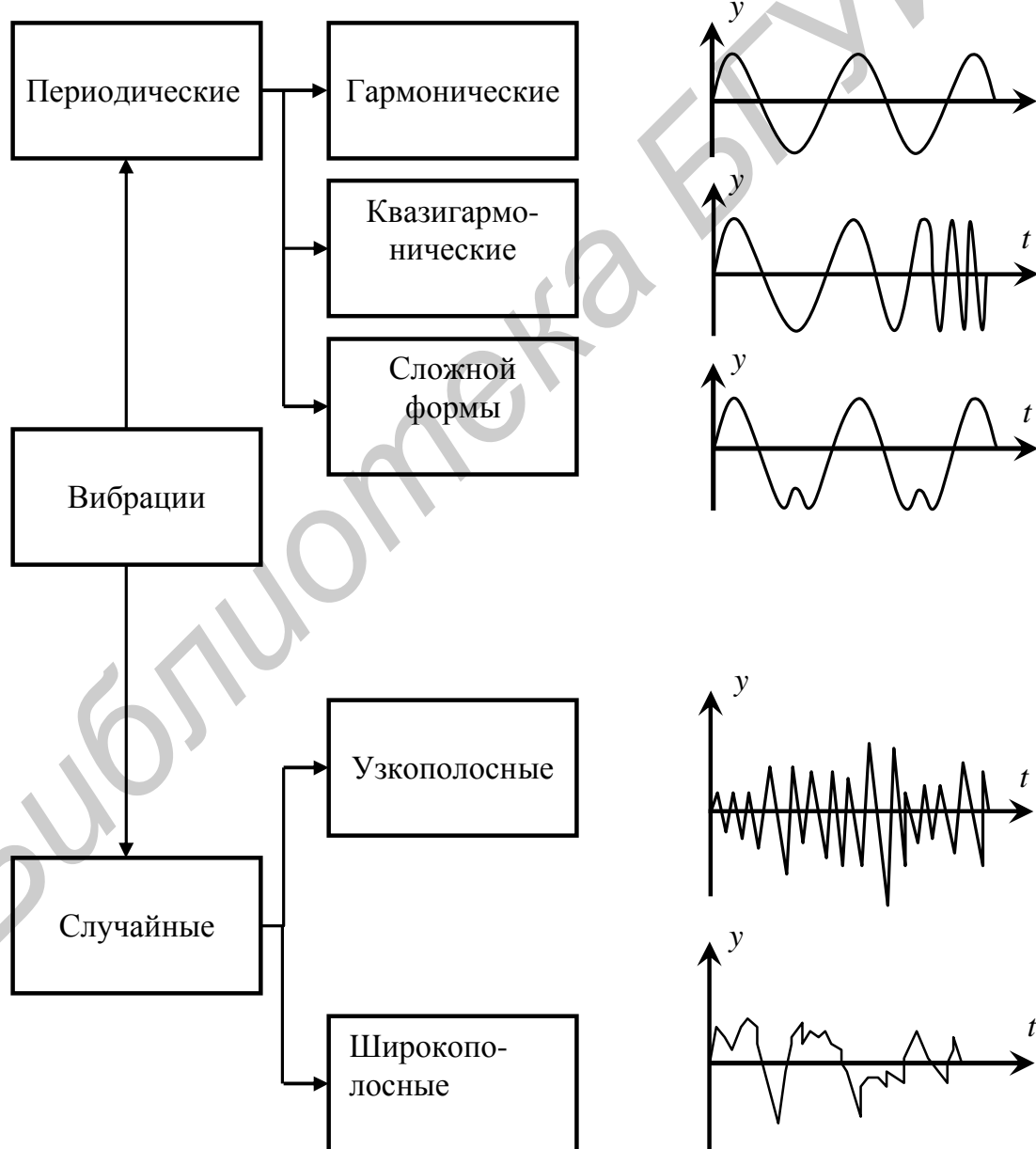


Рис. 6.3. Разновидности вибраций

Ударные нагрузки на аппаратуру могут воздействовать не только при её эксплуатации на подвижных объектах, но и при транспортировании, при погрузочно-разгрузочных работах.

Линейные нагрузки возникают при разгоне и торможении транспортных средств, изменении направления движения.

Акустические шумы возникают при работе мощных двигателей (особенно реактивных), а также из-за аэродинамических эффектов при движении самолетов или ракет в достаточно плотных слоях атмосферы.

Комплексные воздействия – это комбинация из первых четырех вышеназванных. Это, например, может быть одновременное воздействие на аппаратуру вибраций и ударов, вибраций и линейных нагрузок и т.д. Подобные воздействия наиболее часто встречаются в реальных условиях эксплуатации, но их и наиболее трудно воспроизводить в лабораторных условиях при испытаниях аппаратуры.

### 6.2.2. Параметры гармонических вибраций

Гармонические вибрации редко встречаются на подвижных объектах в чистом виде, однако их широко используют при анализе отклика конструкции на механическое воздействие, при проведении испытаний аппаратуры, и, кроме того, любой сложный периодический колебательный процесс можно представить в виде суммы более простых – гармонических. Гармонические вибрации характеризуются амплитудой, периодом колебаний или частотой.

Кроме того, для характеристики гармонического вибрационного процесса используются понятия виброскорости и виброускорения. Если гармоническая вибрация описывается выражением

$$y = A \sin \omega t = A \sin 2\pi f t ,$$

где  $y$  – смещение колеблющегося объекта;

$A$  – амплитуда вибрации;

$t$  – текущее время;

$f = \omega/2\pi$  – частота,

то виброскорость можно определить как первую производную по времени от вибросмещения  $y$ :

$$y' = A\omega \cos \omega t = A2\pi f \cos 2\pi f t .$$

Амплитуда виброскорости:

$$V = A\omega = A2\pi f .$$

Виброускорение определяется как первая производная от виброскорости или вторая производная от вибросмещения:

$$y'' = -A\omega \sin \omega t = -A(2\pi f) \sin 2\pi f t .$$



Амплитуда виброускорения:

$$W = A \omega^2 = A (2\pi f)^2. \quad (6.1)$$

В технической литературе и инженерной практике виброускорение часто выражают в единицах ускорения свободного падения – g.  $1 \text{ g} = 9,8 \text{ м/с}^2$ .

Для перехода от одной единицы измерения величины ускорения ( $W$ ) к другой ( $j$ ) с учётом выражения (6.1) может быть получена формула

$$j = \frac{W}{g} \approx 4 A f^2, \text{ g}. \quad (6.2)$$

### Задача

Конструктивный элемент РЭС колеблется с амплитудой 0,1 мм на частоте 50 Гц. Определить величину воздействующего на него виброускорения.

### Решение

Воспользовавшись формулой (6.2), получим

$$j \approx 4 A f^2 = 4 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} (50)^2 = 1 \text{ g}.$$

Периодические вибрации в виде искаженной синусоиды или другой сложной формы наиболее часто встречаются на реальных подвижных объектах, где могут эксплуатироваться РЭС. Подобные периодические процессы при анализе представляют в виде ряда Фурье:

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (b_n \cos n\omega t + c_n \sin n\omega t),$$

где  $a_0, b_n, c_n$  – коэффициенты ряда Фурье;

$n$  – номер гармонической составляющей.

Амплитуда любой гармоники с номером  $n$  определяется из выражения

$$A_n = \sqrt{b_n^2 + c_n^2}.$$

Графическая интерпретация преобразования Фурье иллюстрируется рис. 6.4.

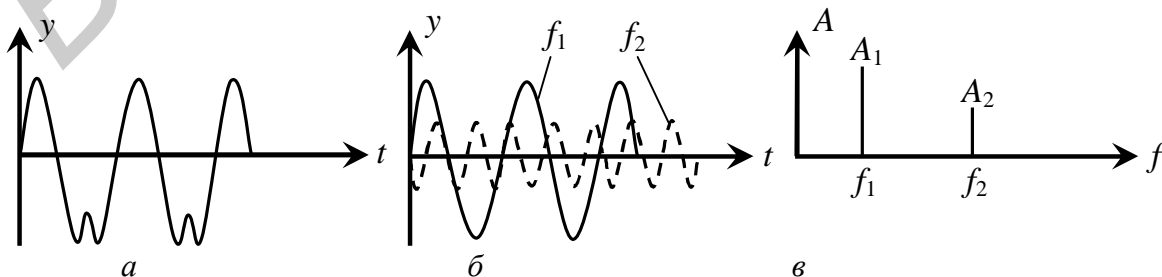


Рис. 6.4. Представление периодического процесса сложной формы:

$a, \bar{b}$  – во временной области;  $v$  – в частотной области

Некоторые современные вычислительные комплексы в библиотеке стандартных программ имеют программу, с помощью которой можно осуществить преобразование периодического процесса сложной формы в ряд Фурье.

Получение исходных данных ( $T, h_i, A_i$ ) для расчёта на ЭВМ по такой программе иллюстрируется рис. 6.5.

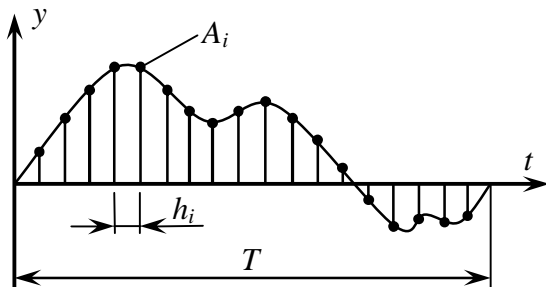


Рис. 6.5. Получение данных для анализа сложного периодического процесса на ЭВМ

Если внешнее воздействие синусоидально, а рассматриваемая линейная система устойчива, то по истечении некоторого промежутка времени свободные колебания системы затухают и остаются только вынужденные колебания, параметры которых вычислить несложно. Однако, если внешняя сила является случайной, то свободные колебания постоянно возобновляются и движение системы является сложной смесью свободных и вынужденных колебаний. Именно такие колебания блоков и элементов РЭС имеют место на подвижных объектах, двигательные установки которых или условия движения создают случайные механические воздействия на борту.

Случайная вибрация в отличие от детерминированной не может быть описана точными математическими соотношениями. Для её характеристики можно использовать математическое ожидание и дисперсию случайной величины. Однако вибрационные процессы могут иметь одинаковые математическое ожидание и дисперсию, но различный характер изменения по оси времени (различная растянутость вдоль временной оси). Поэтому целесообразнее случайную вибрацию характеризовать с помощью метода частотного анализа, а не временного. Для этой цели используются такие характеристики, как спектральная плотность мощности колебательного процесса и корреляционная функция, которые взаимосвязаны между собой соотношением Хинчина–Винера.

Для стационарных случайных функций, математические ожидания которых сохраняют одно и то же постоянное значение при всех значениях аргумента  $t$  и корреляционные функции которых зависят только от разности аргументов  $t_2 - t_1 = \tau$ , спектральная функция

$$S(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} k(\tau) \cos \omega \tau d\tau.$$

Корреляционная функция

$$k(\tau) = \int_0^{\infty} S(\omega) \cos \omega \tau d\omega.$$

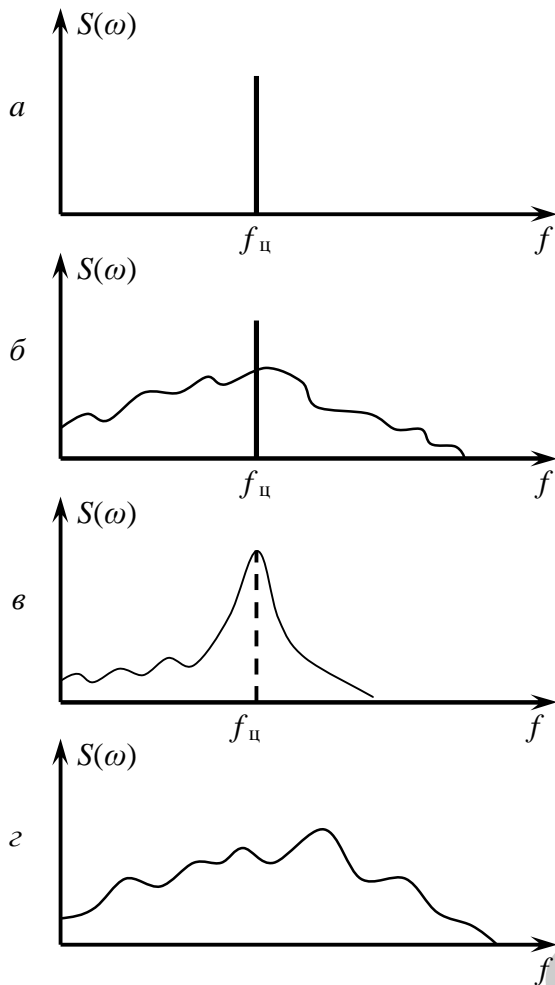


Рис.6.6. Спектральные плотности: *а* – гармонический процесс; *б* – гармонический процесс плюс случайный; *в* – узкополосный случайный процесс; *г* – широкополосный случайный процесс

Функцию  $S$  круговой частоты  $\omega = 2\pi f$  называют спектральной плотностью мощности случайной функции  $x(t)$ , так как при  $\tau = 0$

$$k(0) = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega.$$

Поскольку  $k(0)$  есть мощность стационарной случайной функции  $x(t)$ , то  $S(\omega)$  отражает распределение этой мощности по частотам (рис. 6.6).

### 6.2.3. Воспроизведение механических воздействий на испытательных стендах

Соответствующими стандартами предусмотрены различные виды испытаний РЭС на механические воздействия. Определены и степени жёсткости испытаний, количество которых различно для разных видов. Так, например, для вибраций установлено 14 степеней жёсткости, для ударов – 4 и т.д.

Для воспроизведения *вибраций* используются механические,

электродинамические, гидравлические, пьезоэлектрические и другие разновидности вибростендов. Наибольшее распространение при испытаниях РЭС получили электродинамические и механические вибростенды (рис. 6.7).

*Ударные* испытательные установки могут быть механические (со свободным падением рабочего стола и маятниковые копры), электродинамические и др.

Конструктивное исполнение и принципы действия наиболее употребительных механических установок представлены на рис. 6.8.

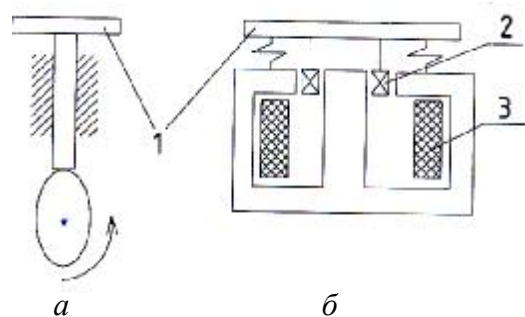


Рис. 6.7. Конструкции механического (*а*) и электродинамического (*б*) вибростендов: 1 – рабочий стол; 2 – подвижная катушка сигнала возбуждения; 3 – катушка подмагничивания

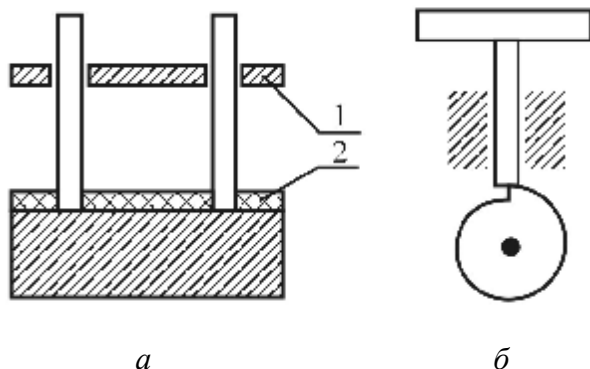


Рис. 6.8. Ударные испытательные установки:  
*a* – со свободным падением рабочего стола; *б* – кулачкового типа для воспроизведения многократных ударных процессов;  
 1 – рабочие столы вибростендов; 2 – прокладка

Линейные нагрузки воспроизводят на центрифугах (вращающихся дисках).

Величина возникающего ускорения на расстоянии  $R$  от центра вращающегося диска определяется выражением

$$W = \frac{V^2}{R},$$

где  $V$  – линейная скорость движения объекта испытаний по окружности.

Акустические шумы воспроизводят в специально оборудованных помещениях либо в реверберационных камерах.

Отсутствие параллельных стенок в подобных камерах позволяет получить в объёме равномерное акустическое поле (исключается появление стоячих волн).

Источниками акустического шума в испытательных установках могут служить:

- динамические сирены;
- статические сирены;
- мощные электродинамические громкоговорители.

Уровни звуковых давлений акустического шума или тона меняющейся частоты могут достигать при испытаниях РЭС 160...170 дБ. Уровень звукового давления в децибелах  $L$  определяется из выражения

$$L_{\text{дБ}} = 20 \lg \frac{P}{P_0}, \quad (6.3)$$

где  $P$  – звуковое давление шума или тона, Па;

$P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па – звуковое давление порога слышимости.

При производстве РЭС возможны следующие виды испытаний:

- обнаружение резонансных частот;
- виброустойчивость;
- вибропрочность;
- ударная прочность;
- воздействие одиночных ударов;
- воздействие линейных (центробежных) нагрузок;
- воздействие акустических шумов.

Испытаниям на обнаружение резонансных частот подвергаются новые разработки конструкций РЭС. Дальнейшие испытания РЭС определяются условиями эксплуатации, и на воздействие наиболее типичных видов нагрузок аппаратура должна быть испытана. Определяющим условием, позволяющим выбрать наиболее рациональный метод испытаний, является информация о значениях резонансных частот изделий, полученных расчётным или экспериментальным путём. Например, если собственная частота печатной платы превышает верхнюю частоту диапазона воздействующих вибраций более чем в 1,5 раза, то применяется метод испытаний на одной фиксированной частоте. Если резонансные частоты не установлены, то применяется метод качающейся частоты. Если объект имеет не менее четырёх собственных частот в заданном диапазоне, используется метод случайной вибрации.

Особенности проведения испытаний на механические воздействия этими замечаниями не ограничиваются. Заинтересованному читателю следует обратиться к литературным источникам по вопросам испытаний РЭС и испытательного оборудования.

#### 6.2.4. Динамические характеристики конструкций РЭС

Для возможности проведения расчётов конструкции аппаратуры и её элементы необходимо предельно упростить, т.е. представить в виде физических моделей (рис. 6.9).

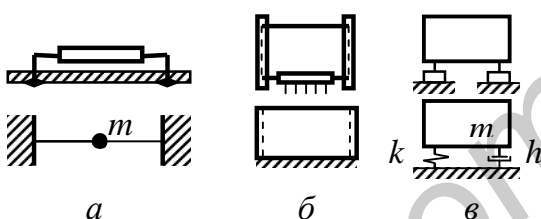


Рис. 6.9. Резистор (а), печатная плата (б), блок аппаратуры (в) и их модели

Для более детального анализа процессов, протекающих в аппаратуре, и её составных элементах при воздействии вибрации используют более сложные модели. Пример такой модели радиоэлектронного аппарата представлен на рис. 6.10, а.

Иногда для анализа механических процессов используют математические (метод конечных разностей, метод конечных элементов и др.), аналоговые и электромеханические модели.

При передаче вибраций по конструкции аппаратуры их амплитуда может и ослабляться и усиливаться (рис. 6.10, б).

Для анализа вибрационных процессов необходимо уметь оценивать основные динамические характеристики аппаратуры и её элементов.

К основным динамическим характеристикам аппа-

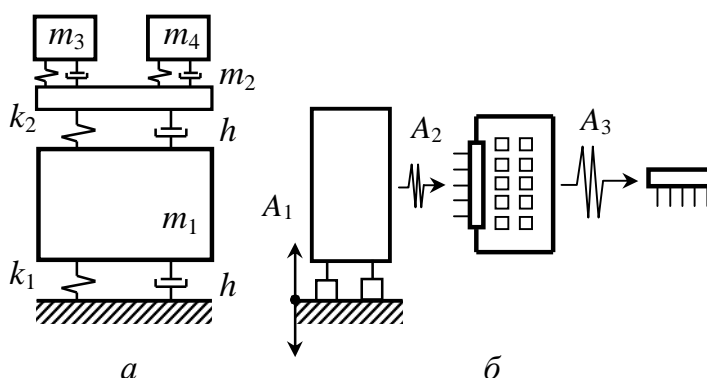


Рис. 6.10. Сложная модель аппарата (а) и динамика передачи вибраций от места закрепления аппарата к элементам, закреплённым на печатной плате (б)

ратуры и её элементов относят значения собственных (резонансных) частот, собственные формы колебаний, значения коэффициентов динамичности и коэффициентов демпфирования.

Значения собственных частот конструктивных элементов аппаратуры (элементов рамных конструкций, пластин и т.д.) определяются по формулам, известным из курса классической механики.

Значения частот собственных колебаний электрорадиоэлементов (ЭРЭ), приводимых к балочным моделям, можно определить аналитически или по номограммам. Например, для резистора, модель которого представлена на рис. 6.9, *a*, резонансная частота определяется из выражения

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{192EJ}{ml^3}}, \quad (6.4)$$

где  $E$  – модуль упругости материала выводов;

$J = \frac{\pi d^4}{64}$  – момент инерции сечения вывода резистора ( $d$  – диаметр вывода резистора);

$m$  – масса резистора;

$l$  – длина резистора.

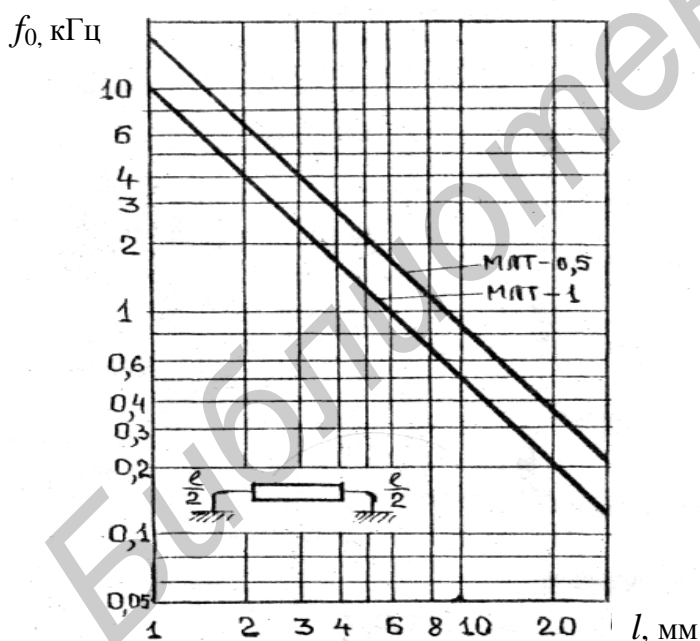


Рис. 6.11. Номограмма для определения значения  $f_0$  резисторов типа МЛТ в зависимости от суммарной длины выводов

Подобные расчёты удобнее выполнять с использованием номограмм, разработанных для наиболее употребительных ЭРЭ (резисторов и конденсаторов).

Вид одной из таких номограмм представлен на рис. 6.11. Зная тип и типоразмер резистора, длину его выводов, определяют значение собственной частоты.

Значение первой собственной частоты печатной платы, закрепленной по углам в четырёх точках, можно определить, воспользовавшись выражением

$$f_0 = \frac{\pi}{2} \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{m}}, \quad (6.5)$$

где  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\gamma^2)}$  – цилиндрическая жёсткость платы;

$m'' = \frac{m}{ab}$  – распределённая по площади масса платы и элементов, размещённых на плате;

$E$  – модуль упругости материала платы;

$h$  – толщина платы;

$m$  – масса платы с элементами (ИМС, ЭРЭ и т.д.);

$a$  – длина платы;

$b$  – ширина платы;

$\gamma$  – коэффициент Пуассона для материала платы.

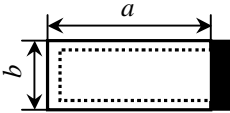
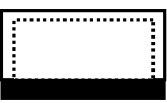

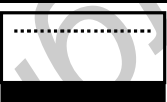


Более общее выражение для расчёта значения собственных частот пластин имеет вид

$$f_0 = \frac{K_a}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{D}{m''}}, \quad (6.6)$$




где  $K_a$  – коэффициент, зависящий от способа закрепления пластины (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Значения коэффициента  $K_a$  для различных способов закрепления сторон пластин

Вариант закрепления сторон пластины	$K_a$	Номер формулы
	$15,42 \sqrt{1 + 0,95 \left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0,41 \left(\frac{a}{b}\right)^4}$	(6.7)
	$9,87 \sqrt{1 + 2,33 \left(\frac{a}{b}\right)^2 + 2,44 \left(\frac{a}{b}\right)^4}$	(6.8)
	15,42	(6.9)
	$15,42 \left(\frac{a}{b}\right)^2$	(6.10)
	22,37	(6.11)
	$22,37 \sqrt{0,1 \left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0,41 \left(\frac{a}{b}\right)^4}$	(6.12)

Примечание. Обозначения штриховок:

 – жёсткое закрепление стороны пластины;  – сторона лежит на опоре;  – сторона пластины свободна.

В практике проектирования печатных плат РЭС иногда пользуются формулой несколько иного вида:

$$f_0 = k_m k_b B h \frac{10^4}{a^2}, \quad (6.13)$$

где  $k_m$  – коэффициент, зависящий от материала платы (для гетинакса – 0,5, для стеклотекстолита – 0,52);

$$k_b = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{m_{\Sigma}}{m_{\Pi}}}}$$

– коэффициент, зависящий от массы элементов  $m_{\Sigma}$ , размещённых на поверхности платы, масса которой  $m_{\Pi}$ ;

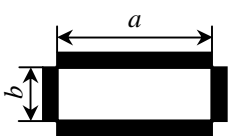
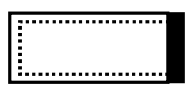


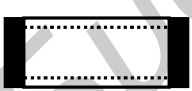

$B$  – коэффициент, зависящий от соотношения длины сторон и способа закрепления платы (табл. 6.2);

$h$  – толщина платы, см;

$a$  – длина платы, см.

Таблица 6.2

Значения коэффициента  $B$

Варианты закрепления сторон платы	$a/b$							
	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0
	-	-	86	145	234	352	497	868
	40	41	56	84	124	176	240	864
	10	19	58	124	217	336	479	855
	33	44	76	139	230	349	494	866
	54	56	69	93	131	181	244	406
	54	58	76	115	175	254	353	607

Для блока, установленного на виброизоляторах, значение  $f_0$  определяется из выражения

$$f_0 = \frac{1}{2p} \sqrt{\frac{K_{\Sigma}}{m}}, \quad (6.14)$$



где  $K_{\Sigma}$  – суммарная жёсткость используемых виброизоляторов;

$m$  – масса блока.

### Задача

Блок РЭС массой 10 кг установлен на четырёх равнонагруженных виброизоляторах, жёсткость каждого из которых при осевом нагружении составляет 4 Н/мм. Определить значение частоты собственных колебаний блока в вертикальном направлении.

### Решение

Применяя формулу (6.14), получим

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\Sigma}}{m}} = \frac{1}{6,28} \sqrt{\frac{4 \cdot 4 \cdot 10^3}{10}} \approx 6,4 \text{ Гц.}$$

Собственные формы колебаний представляют собой виброрельефы колебаний конструктивных элементов типа балок и плит на соответствующих резонансных частотах (рис. 6.12).

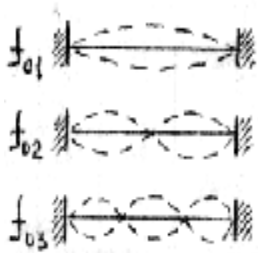


Рис. 6.12. Конструктивный элемент в виде балки и его три первые собственные формы колебаний

Важной динамической характеристикой печатных плат и других конструктивных элементов аппаратуры является *коэффициент динамичности*, который представляет собой отношение амплитуды колебаний блока или центра печатной платы ( $A$ ) к амплитуде колебаний основания или точек закрепления платы ( $A_0$ ):

$$m = \frac{A}{A_0}. \quad (6.15)$$

Графики зависимости значения  $\mu$  конструктивного элемента от частоты воздействующей вибрации  $f$  при различных значениях логарифмического декремента затуханий ( $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ ) представлены на рис. 6.13.

Из приведенных кривых видно, что  $\mu$  может принимать значение как больше, так и меньше единицы, т.е. конструктивный элемент или блок аппаратуры в зависимости от частоты возмущающей силы может как усиливать, так и ослаблять вибрацию.

График изменения  $\mu$  в зависимости от частоты называют амплитудно-частотной характеристикой конструктивного элемента. Эта характеристика в дальнейшем будет использована для обоснования и оценки эффективности различных способов виброзащиты.

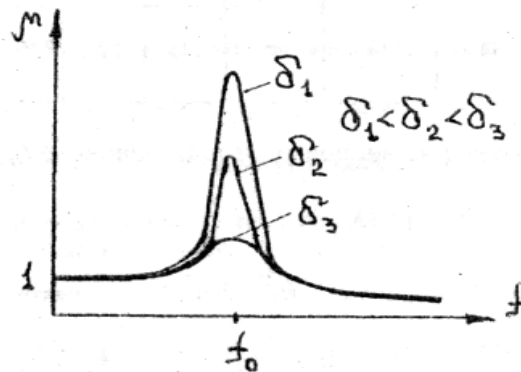


Рис. 6.13. Зависимость значения  $\mu$  от частоты вибрации  $f$

Коэффициент динамичности для любого значения текущей частоты  $f$  может быть определён по формуле

$$\mu = \frac{A}{A_0} = \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 a^2}{(1 - a^2)^2 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 a^2}}, \quad (6.16)$$

где  $\delta$  – логарифмический декремент затухания колебаний;

$a = f/f_0$  – коэффициент расстройки по частоте;

$f_0$  – значение собственной частоты.

### Задача

Определить амплитуду колебаний центра печатной платы на частоте  $f = 100$  Гц, если амплитуда точек закрепления платы  $A_0 = 1$  мм, значение её собственной частоты  $f_0 = 200$  Гц, а значение логарифмического декремента затухания колебаний платы  $\delta = 0,1$ .

### Решение

1. Определяем значение коэффициента расстройки по частоте:

$$a = f/f_0 = 100 / 200 = 0,5.$$

2. Определяем амплитуду колебаний центра печатной платы. Из выражения (6.16) находим

$$A = A_0 \cdot \mu = A_0 \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 a^2}{(1 - a^2)^2 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 a^2}} \approx 1,3 \text{ мм.}$$

Из полученного результата следует, что при таком соотношении частот ( $f = 100$  Гц и  $f_0 = 200$  Гц) плата практически не усиливает воздействующую вибрацию ( $A \approx 1,3$  мм).

При проведении расчётов динамических характеристик конструкций, особенно в области резонансной частоты, необходимо учитывать их поглощающие свойства при колебаниях. Влияние этих свойств на значение коэффициента динамичности в диапазоне частот показано на рис. 6.13.

Наиболее часто в инженерной практике для оценки поглощающих свойств конструктивных элементов используется логарифмический декремент затухания колебаний. Его значение достаточно просто может быть определено

экспериментально даже для конструктивного элемента, состоящего из комбинации разнородных материалов, например многослойной печатной платы.

Если имеется запись свободных затухающих колебаний механической системы (рис. 6.14), то значение логарифмического декремента затухания колебаний определяется из выражения

$$d = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}}.$$

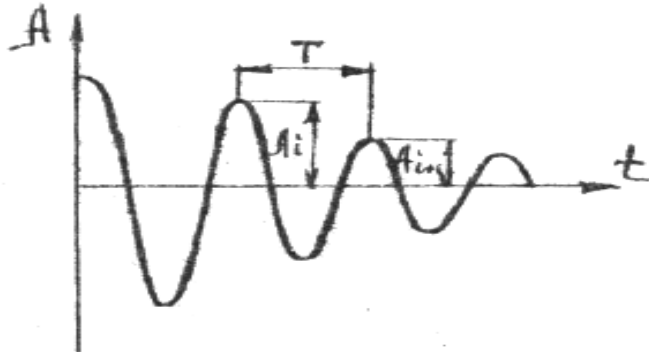


Рис. 6.14. Запись свободных затухающих колебаний

При учёте нескольких периодов колебаний  $T$ , например  $n$ ,

$$d = \frac{1}{n} \ln \frac{A_i}{A_{i+n}}.$$

Если имеется амплитудно-частотная характеристика

(АЧХ) механической системы в области собственной частоты  $f_0$  (рис. 6.15), то

$$d = p \frac{\Delta f}{f_0}, \quad (6.17)$$

где  $\Delta f$  – ширина полосы частот на уровне 0,707 от максимального значения амплитуды.

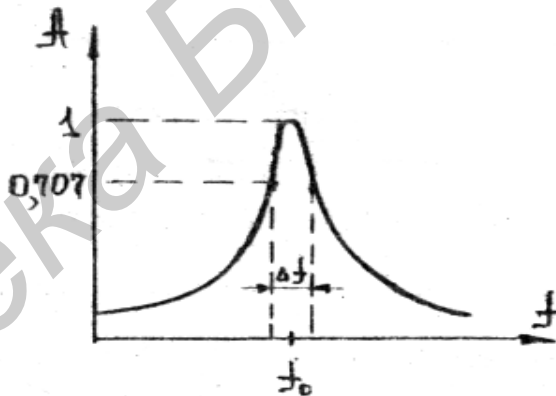


Рис. 6.15. Амплитудно-частотная характеристика

### Задача

Определить значение логарифмического декремента затуханий для печатной платы, собственная частота которой  $f_0 = 200$  Гц, а ширина полосы частот на уровне 0,707 составляет 20 Гц.

### Решение

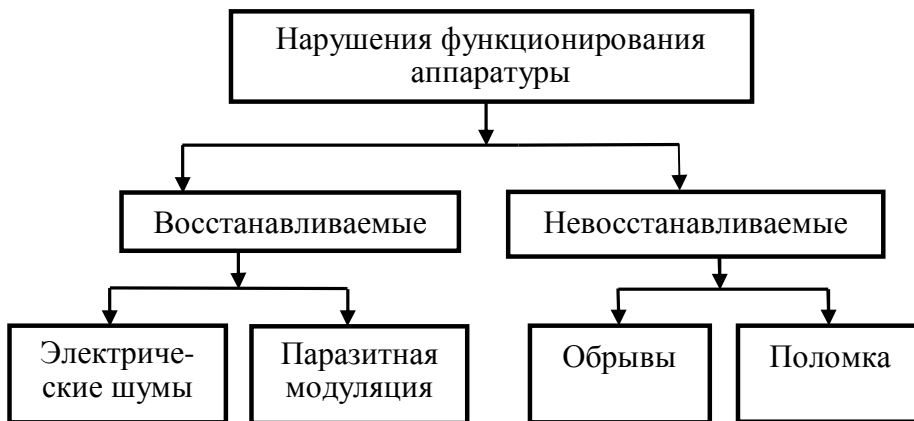
Пользуясь формулой (6.17), находим

$$\delta = \pi \frac{\Delta f}{f_0} = 3,14 \frac{20}{200} = 0,314.$$

### 6.2.5. Реакция конструкций РЭС на механические воздействия

При воздействии на радиоэлектронную аппаратуру вибраций, ударов, ли-

нейных нагрузок и акустических шумов возможно возникновение нарушений её функционирования, которые можно классифицировать следующим образом (рис. 6.16).



Восстанавливаемые отказы функционирования аппаратуры, к которым относят искажение или появление в полезном сигнале большого уровня шумов и паразитную модуляцию полезного сигнала, возникают из-за

Рис. 6.16. Классификация нарушений функционирования аппаратуры

тензорезистивных эффектов, пьезоэлектрических и электромагнитных явлений в элементах РЭС, обладающих способностью к проявлению подобных эффектов при знакопеременных деформационных нагрузках. К подобным элементам аппаратуры можно отнести тонкоплёночные резисторы на подложках микросхем, сегнетокерамические конденсаторы, полупроводниковые приборы и даже обычные проводники, колеблющиеся в магнитных полях.

Невосстанавливаемые отказы, к которым приводят различного рода обрывы и поломки, окончательно выводят аппаратуру из строя, и её функционирование не возобновляется после прекращения воздействия вибрации. Примерами такого рода отказов могут быть, например, разрывы дорожек печатного монтажа вибрирующей платы, разрушение паяных, сварных и клеевых соединений, обрывы выводов резисторов, конденсаторов и т.д.

Разновидности механических процессов, возникающих в элементах конструкций РЭА при воздействии вибрации, иллюстрируются на рис. 6.17.

При воздействии на конструктивный элемент аппаратуры вибрации малого уровня возникает его динамическая упругая деформация  $\varepsilon$ , которую можно оценить отношением величины удлинения или укорочения элемента  $\Delta l$  к его исходной длине  $l$ .

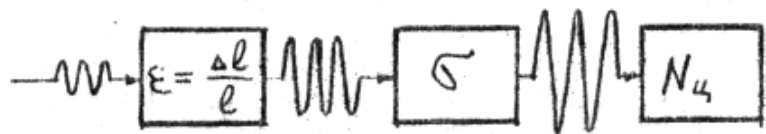


Рис. 6.17. Возможные виды реакции конструктивного элемента аппаратуры на вибрацию

При увеличении уровня вибрационной нагрузки возможно появление в конструктивном элементе из металла пластических деформаций, которые приводят к возникновению остаточных механических напряжений  $\sigma$ .

При больших уровнях вибрационной нагрузки возможно разрушение конструктивного элемента после некоторого количества циклов ( $N_{ц}$ ) изменения нагрузки, обусловленной вибрацией. Определение количества циклов измене-

ния нагрузки до разрушения  $N_{ц}$  производится для металлов по линиям Веллера.

В общем виде линии Веллера или кривые усталости металлов представляют собой графические зависимости числа циклов изменения нагрузки до разрушения ( $N_{ц}$ ) от величины переменного механического напряжения  $\sigma$  (рис. 6.18).

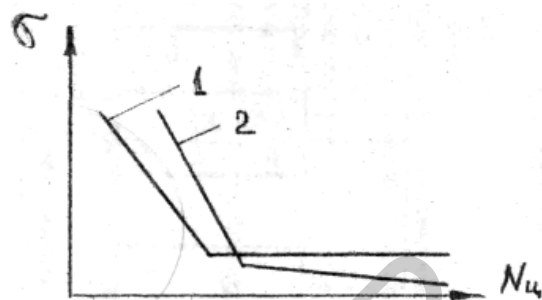


Рис. 6.18. Линии Веллера для стали (1) и цветных металлов (2)

Ход линии Веллера для стали параллельно оси  $N_{ц}$  для малых значений механических напряжений физически означает то, что в таком случае конструктивный элемент практически выдержит бесконечное число циклов изменения нагрузки ( $N_{ц} \rightarrow \infty$ ).

Кроме механической составляющей реакции элементов РЭС на механические воздействия существует и электрическая составляющая, обусловленная механическими процессами – деформацией и механическими напряжениями (рис. 6.19).

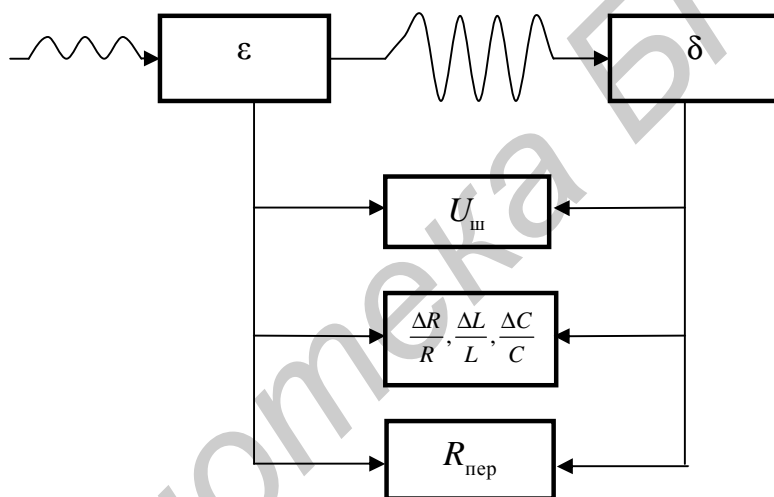


Рис. 6.19. Реакция активных и пассивных элементов РЭС на механические воздействия:

$U_{ш}$  – появление напряжения шумов;  $\frac{\Delta R}{R}, \frac{\Delta L}{L}, \frac{\Delta C}{C}$  – изменение параметров пассивных элементов РЭС;  $R_{пер}$  – нестабильность переходных сопротивлений

Эта составляющая реакции определяет устойчивость РЭС к механическим воздействиям и должна учитываться при проектировании чувствительной аппаратуры, с помощью которой осуществляется преобразование сигналов малого уровня.

Под устойчивостью аппаратуры понимают её нормальное функционирование при механических воздействиях. Если РЭС не обладает достаточной устойчивостью, то в её выходном сигнале могут появиться составляющие, не предусмотренные функциональным назначением. Возможно появление и шумового напряжения достаточно высокого уровня. Наиболее типичными причинами нарушения устой-

чивости работы РЭС при механических воздействиях являются следующие.

1. Изменение значения переходного сопротивления в контактных группах разъёмов, реле, герконов и т.д.

2. Изменение параметров пассивных элементов РЭС (тонкоплёночных резисторов, катушек индуктивности, некоторых типов конденсаторов).

3. Изменение параметров активных элементов РЭС – ИМС и ПП.

4. Появление шумовых напряжений в проводниках, колеблющихся в магнитных полях.

5. Появление шумовых напряжений в кабелях за счёт возникающих электрических зарядов на деформируемых при механических воздействиях высококачественных диэлектриках.

Основные виды откликов элементов РЭС на механические воздействия и возможные защитные мероприятия представлены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Основные виды реакции элементов РЭС на механические воздействия

Элементы РЭС	Возможный механический отклик	Возможный электрический отклик	Защитные мероприятия
Резисторы и конденсаторы: а) дискретные б) плёночные в) переменного сопротивления	Разрушение мест пайки, обрывы выводов Трещины в плёнке  Поворот оси ротора и смещение пластин КПЕ Поворот оси резистора	Разрыв электрической цепи, тензоэффект  Изменение значения ёмкости Изменение значения сопротивления	Исключение резонансных колебаний. Размещение элементов на участках подложек с минимальной деформацией. Стопорение оси контргайками, гровершайбами, нитроклеем или лаком
ППП, ИМС	Обрывы выводов, разрушение мест пайки. Деформация и растрескивание подложек ИМС	Пьезоэффект, тензоэффект	Дополнительное крепление компаундом. Размещение элементов на участках плат с минимальной деформацией
Реле, разъёмы, переключатели, герконы	Взаимное перемещение контактных элементов	Переменное значение переходного сопротивления	Определенная ориентация контактных групп относительно вектора воздействующих вибраций
Провода и кабели	Перемещения в пространстве, деформация и обрывы, особенно в местах пайки	Виброшумы за счёт электромагнитной индукции и кабельного эффекта	Вязка в жгуты, дополнительные точки крепления, использование antivибрационного кабеля, например типа АВК-6

### 6.2.6. Защита конструкций РЭС от вибраций

При решении задач по защите конструкций РЭС от механических нагрузок пользуются понятиями прочность и устойчивость. *Прочность* к воздействию механических нагрузок – это способность изделий выполнять свои функции и сохранять свои параметры в пределах норм, установленных в технической документации, *после воздействия* механических нагрузок.

*Устойчивость* к воздействию механических нагрузок – это способность изделий выполнять свои функции и сохранять свои параметры в пределах норм, установленных в стандартах, *во время воздействия* механических нагрузок.

К изделиям, предназначенным для функционирования в условиях воздействия механических нагрузок, предъявляют требования по прочности и устойчивости. К изделиям, не предназначенным для функционирования в условиях воздействия механических нагрузок, предъявляют требования только по прочности.

Как следует из приведённых выше определений, обеспечение устойчивости является более сложной технической задачей, чем обеспечение прочности.

Способы защиты конструкций РЭС от вибраций удобно классифицировать и наглядно представить, если использовать зависимость коэффициента динамичности  $\mu$  от частоты  $f$ . Используя эту зависимость, можно выделить три разновидности способов виброзащиты (рис. 6.20).

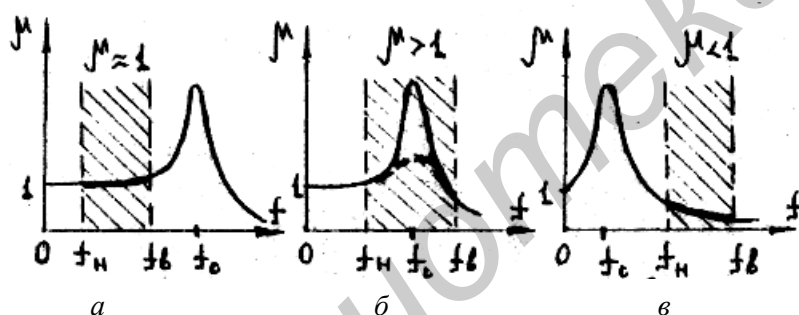


Рис. 6.20. Способы виброзащиты:

- a* – увеличение жёсткости конструктивных элементов (увеличение  $f_0$ );
- б* – использование конструктивных элементов с увеличенной степенью демпфирования;
- в* – использование виброизоляторов

На рис. 6.20 представлено соотношение собственной резонансной частоты защищаемого конструктивного элемента  $f_0$  относительно диапазона частот воздействующих вибраций от  $f_H$  до  $f_B$ . Как следует из рис. 6.20, вывод резонансной частоты  $f_0$  элемента за пределы диапазона частот воздействующих вибраций в более высокочастотную область позволяет в диапазоне частот воздействующих вибраций обеспечить значение коэффициента динамичности  $\mu \approx 1$ . Это означает, что резонансного возбуждения колебаний защищаемого элемента происходить не будет. Подобное смещение значения  $f_0$  в более высокочастотную область можно обеспечить увеличением жёсткости конструктивных элементов.

Примеры конструктивного исполнения элементов аппаратуры, обладающих повышенной жёсткостью, представлены на рис. 6.21.

На рис. 6.20, б показано изменение хода зависимости  $\mu$  от  $f$  при использовании конструктивных элементов, обладающих повышенной

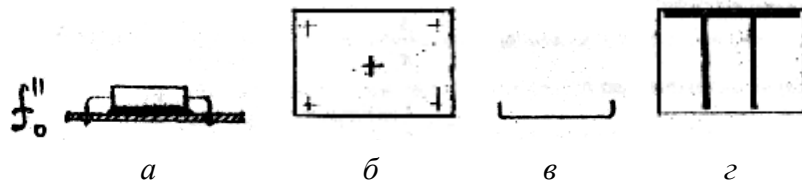


Рис. 6.21. Конструктивные решения, позволяющие увеличить жёсткость: *а* – применение дополнительных точек или площадок крепления с помощью клея; *б* – применение дополнительных точек крепления; *в* – применение отбортовок и профилирования (для пластин из металла); *г* – применение ребер жёсткости

степенью демпфирования (пунктирная кривая). Большую степень демпфирования колебаний можно обеспечить, например, используя платы с вибропоглощающим покрытием, слоистые конструкции либо заливку демпфирующими материалами (например компаундом) поверхности платы с элементами.

Применение демпфирующих покрытий и слоистых конструкций позволяет снизить значения коэффициентов динамичности таких конструктивных элементов, как печатные платы с нескольких десятков до нескольких единиц, причем в области их резонансных колебаний. К недостаткам этого способа виброзащиты следует отнести ухудшение ремонтоспособности РЭС, зависимость характеристик покрытий и заливок от температуры, возникновение больших внутренних напряжений в компаунде при его полимеризации, изменение свойств покрытий и заливок с течением времени. Кроме того, величина рассеяния энергии механических колебаний полимерными материалами зависит от частоты, амплитуды и формы колебаний, состава компонентов, вида напряжённого состояния. Эти обстоятельства усложняют аналитическую оценку эффективности виброзащиты, и в данном случае рациональнее использовать экспериментальные методы определения коэффициента механических потерь  $\eta$  через логарифмический декремент затухания колебаний:

$$h = d/p, \quad (6.18)$$

или через механическую добротность:

$$\eta = 1/Q. \quad (6.19)$$

Некоторые экспериментальные методы определения логарифмического декремента затухания колебаний конструкции изложены в п. 6.2.3 данного пособия.

Наиболее эффективным способом виброзащиты является виброизоляция, так как только в этом случае удастся получить значения коэффициента динамичности  $\mu < 1$  в диапазоне частот воздействующих вибраций (см. рис. 6.20). Подобный способ виброзащиты может быть использован как для блоков, так и для отдельных чувствительных к вибрациям элементов аппаратуры. Виброизоляция обеспечивается тем, что между защищаемым аппаратом или его элементом и вибрирующей поверхностью устанавливаются специальные элементы – виброизоляторы. Некоторые схемы монтажа блоков на виброизоляторах представлены на рис. 6.22.



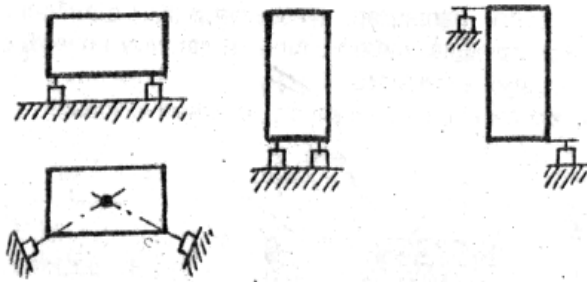


Рис. 6.22. Схемы монтажа блоков аппаратуры на виброизоляторах

Установка блоков на виброизоляторах обеспечивает значение их собственных частот  $f_0 \approx 10...25$  Гц. В этом случае, начиная с частот 30–40 Гц, обеспечивается эффективная защита блока от вибраций ( $\mu < 1$ ) и чем выше частота воздействующей вибрации, тем эффективнее виброзащита.

Используемые в настоящее время виброизоляторы можно подразделить на 4 основных вида:

- 1) резинометаллические;
- 2) пружинные с воздушным демпфированием;
- 3) пружинные с фрикционным демпфированием;
- 4) цельнометаллические.

В качестве примера конструктивного исполнения виброизолятора на рис. 6.23 показан вид пружинного виброизолятора с воздушным демпфированием. Демпфирование колебаний в данной конструкции обеспечивается движением воздуха через небольшое отверстие в резиновом баллончике 2.

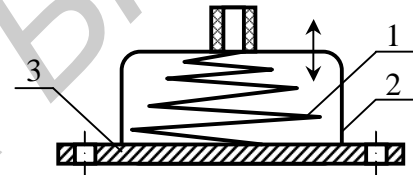


Рис. 6.23. Виброизолятор пружинный с воздушным демпфированием: 1 – пружина; 2 – резиновый баллончик с отверстием; 3 – элемент крепления

Оценку эффективности виброизоляции в первом приближении можно сделать следующим образом.

1. Определяют значение собственной резонансной частоты блока на виброизоляторах:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\Sigma}}{m}}, \quad (6.20)$$

где  $K_{\Sigma}$  – суммарная жёсткость системы виброизоляции;  
 $m$  – масса блока.

2. Определяют значение амплитуды вынужденных колебаний блока либо значение коэффициента динамичности блока на виброизоляторах в диапазоне частот воздействующих вибраций:

$$A = \frac{A_0}{\left| 1 - \left( \frac{f}{f_0} \right)^2 \right|} \quad \text{или} \quad \mu = \frac{1}{\left| 1 - \left( \frac{f}{f_0} \right)^2 \right|}, \quad (6.21)$$

где  $A_0$  – амплитуда колебаний основания в месте монтажа блока;

$f$  – текущее значение частоты вибрации;

$f_0$  – собственная резонансная частота блока на виброизоляторах.

3. По известным значениям амплитуды колебаний блока и частоты вибрации определяют значение возникающего ускорения и сравнивают его с допустимым:

$$j = 4 A f^2 \leq j_{\text{доп}}. \quad (6.22)$$

Оценку эффективности виброизоляции по такой методике можно выполнить с помощью ЭВМ. Структурная схема алгоритма подобного расчёта приведена на рис. 6.24. Она позволяет из совокупности виброизоляторов, данные о которых введены в память ЭВМ, выбрать те, которые обеспечивают необходимую степень виброизоляции по величине амплитуды колебаний блока. В данной структурной схеме может быть использован и другой критерий оценки эффективности виброизоляции – виброускорение.

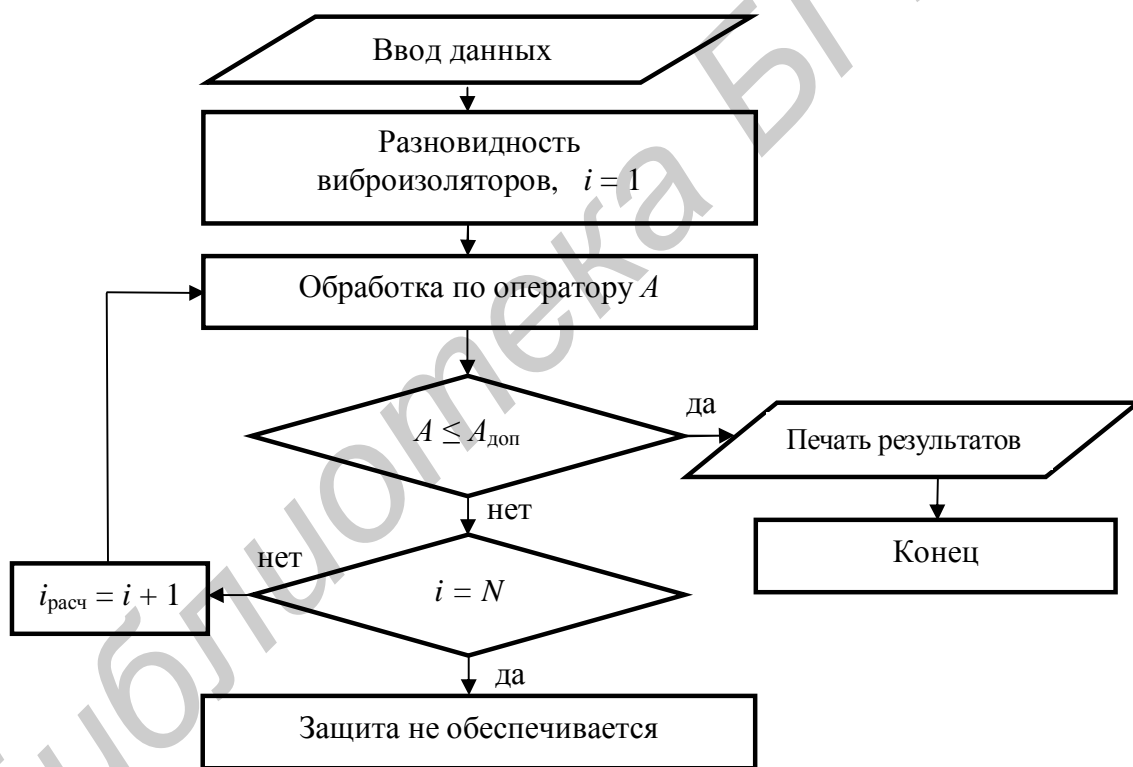


Рис. 6.24. Структурная схема алгоритма выбора виброизоляторов с помощью ЭВМ

### 6.2.7. Защита РЭС от ударов, линейных нагрузок и акустических шумов

Реакция элементов и блоков РЭС на ударные нагрузки определяется не только величиной амплитуды ускорения воздействующего ударного импульса, но и соотношением длительности ударного импульса и периода собственных колебаний объекта (рис. 6.25).

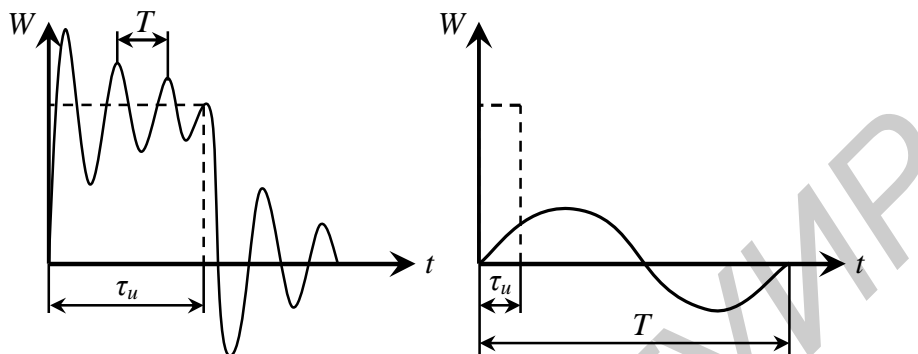


Рис. 6.25. Реакция конструктивного элемента или блока РЭС при различных соотношениях длительности ударного импульса  $\tau_u$  и периода собственных колебаний объекта  $T$

Большая величина отклика будет наблюдаться у конструктивных элементов, полупериод собственных колебаний которых сравним или меньше длительности ударного импульса. Другими словами, чем короче ударный процесс (меньше длительности  $\tau_u$ ), тем меньше число конструктивных элементов РЭС в максимальной степени будет реагировать на такое воздействие.

Этот вывод позволяет рекомендовать к использованию системы виброизоляции для защиты блоков РЭС и от ударных нагрузок, так как установка блоков на виброизоляторы приводит к увеличению значения  $T$  (значение  $f_0$  блока на виброизоляторах мало). При проектировании подобных систем виброизоляции следует иметь в виду то обстоятельство, что установка блока на слишком «мягкие», низкочастотные виброизоляторы может привести при ударной нагрузке к их деформации до упора и к потере эффективности такой защиты. Поэтому для защиты от ударных нагрузок рекомендуется использовать более жесткие, высокочастотные виброизоляторы, обеспечивающие при номинальной их нагрузке значения собственных частот систем виброизоляции в пределах 25... 30 Гц.

Оценить эффективность защиты блока на виброизоляторах от ударных нагрузок можно по следующей упрощенной методике, в соответствии с которой последовательно определяются динамические характеристики и параметры блока.

1. Частота собственных колебаний блока:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_{\Sigma}}{m}}, \quad (6.23)$$

где  $K_{\Sigma}$  – суммарная жёсткость виброизоляторов;  
 $m$  – масса блока.

2. Условная частота воздействующего ударного процесса:

$$w = p / t, \quad (6.24)$$

где  $\tau$  – длительность ударного импульса.

3. Отношение частот:

$$g = w / w_0. \quad (6.25)$$

4. Коэффициент передачи удара (для полусинусоидального ударного импульса):

$$K_{\text{уд}} = \frac{2g}{g^2 - 1} \cos \frac{p}{2g}. \quad (6.26)$$

5. Ускорение блока в момент удара

$$j_{\text{max}} = j_{\text{осн}} \cdot K_{\text{уд}}. \quad (6.27)$$

6. Максимальное значение смещения блока при ударе:

$$A_{\text{max}} = j_{\text{max}} / w_0^2. \quad (6.28)$$

Защита от линейных нагрузок, которые характеризуются воздействием на РЭС и её элементы инерционных сил, изменяющихся с течением времени достаточно медленно, сводится к увеличению прочностных свойств конструктивных элементов и их жёсткости. Эти мероприятия, которые можно оценить методами технической механики при воздействии на объекты статических сил, предотвращают разрушение конструкций и недопустимые отклонения их частей от статического положения, что может привести к коротким замыканиям, соприкосновениям элементов и т.д.

Защита РЭС от акустических шумов обеспечивается конструкционным демпфированием (вибропоглощающие покрытия и слоистые конструкции для печатных плат) и использованием звукоизолирующих перегородок.

### 6.2.8. Защита РЭС при транспортировании

РЭС должны доставляться с завода-изготовителя к потребителю неповрежденными при транспортировании. Во время транспортирования и при проведении погрузочно-разгрузочных работ возможны ударные и вибрационные воздействия. Для защиты от подобных воздействий, климатических факторов, а также для сохранения товарного вида используется упаковка РЭС и их элементов.

Наиболее употребительное конст-

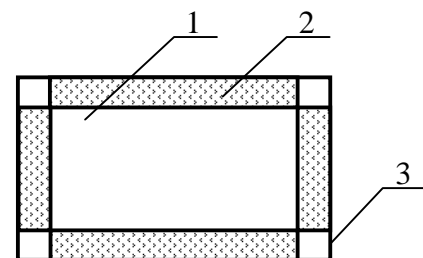


Рис. 6.26. Упаковка РЭС:  
1 – упаковываемое изделие;  
2 – прокладка; 3 – внешний контейнер

руктивное исполнение упаковки включает достаточно жесткий внешний контейнер из картона или дерева и упаковочные прокладки между стенками контейнера и упаковываемым изделием (рис. 6.26).

В качестве материала для изготовления упаковочных прокладок используется пенополистирол, гофрированный картон, пенополиуретан, войлок и др. Основное требование к упаковочным материалам – малая жёсткость или, другими словами, возможность относительно легкого деформирования под нагрузкой. Деформирование прокладки при ударе «растягивает» ударный процесс по времени и снижает уровень ударной нагрузки, действующей на упакованный аппарат (рис. 6.27).

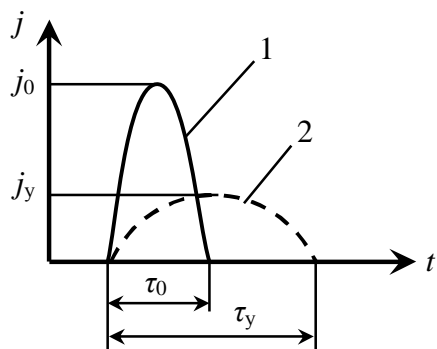


Рис. 6.27. Ударные импульсы:  
1 – для аппарата без упаковки;  
2 – для аппарата в упаковке

Потенциальная энергия ( $W_{\text{пот}}$ ) изделия в упаковке массой  $m$ , поднятого на высоту  $h$ :

$$W_{\text{пот}} = Gh = mgh. \quad (6.29)$$

При ударе из-за смятия или деформации упаковки упакованное изделие проходит так называемый путь торможения  $l$ . Если считать силу  $F$  постоянной, то работа торможения

$$W_{\text{торм}} = F \cdot l. \quad (6.30)$$

Приравняв эту работу к потенциальной энергии, определяемой выражением (6.29), получим

$$F = \left( \frac{h}{l} \right) mg. \quad (6.31)$$

Отношение  $h/l$  показывает, насколько «увеличивается вес» упаковочной единицы за счёт удара. Для снижения уровня динамических нагрузок на изделие это отношение уменьшают за счёт увеличения  $l$ , т.к.  $h$  фиксировано. Конструкция упаковки это и обеспечивает. Если же упругость тары недостаточна, то в упаковке предусматривают дополнительные демпфирующие элементы.

В качестве примера на рис. 6.28 представлен вариант упаковки телевизионного приёмника. Как видно из рис. 6.28, упаковочные прокладки могут быть не сплошными по всем граням изделия, а, например, состоящими из двух профилированных накладок из пенополистирола, охватывающих только две грани упаковываемого аппарата. Остальные грани аппарата 1 защищены от возможных повреждений выступающими частями прокладок 2.

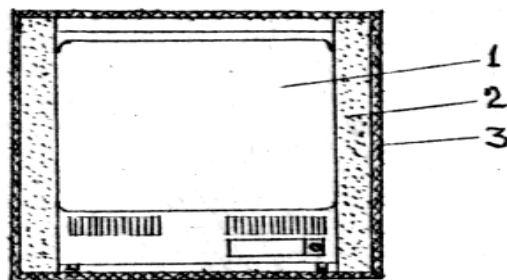


Рис. 6.28. Вариант выполнения упаковки:  
1 – аппарат; 2 – упаковочная прокладка;  
3 – картонная коробка

Перед упаковкой аппарат может дополнительно помещаться в пакет из полиэтиленовой плёнки.

Одна из методик расчёта необходимой величины жёсткости материала упаковки изложена в стандарте [8].

Поясним суть этой методики на конкретном примере.

### Задача

*Дано:* прибор массой 70 кг должен быть упакован так, чтобы максимальное значение возникающего ускорения не превышало  $8g$  при предполагаемой высоте падения  $h = 0,4$  м.

*Определить* необходимую жёсткость упаковочного материала и собственную частоту прибора в упаковке.

### Решение

Для решения задачи используются две номограммы (рис. 6.29, 6.30).

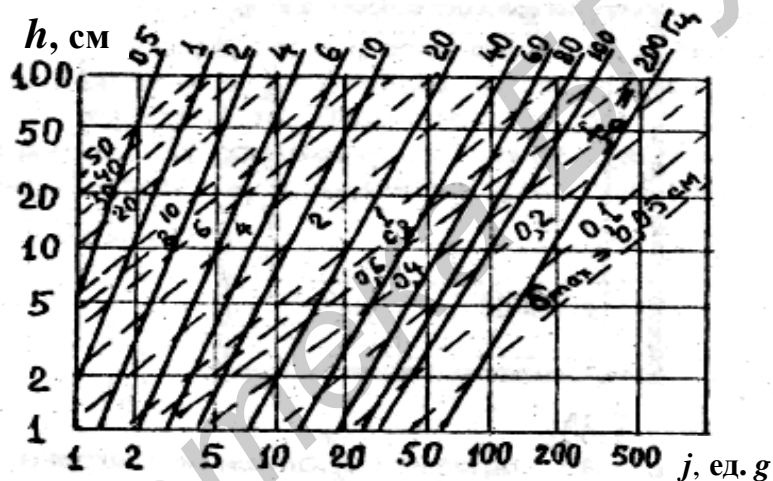


Рис. 6.29. Номограмма для определения собственной частоты прибора в упаковке

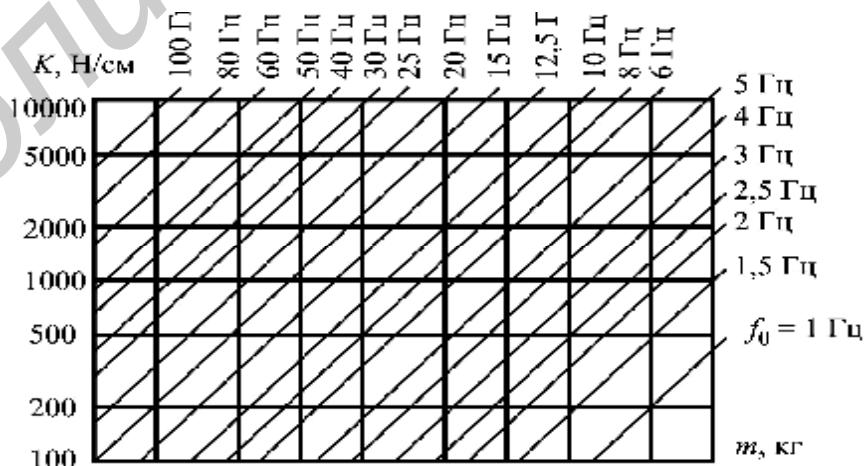


Рис. 6.30. Номограмма для определения жёсткости упаковки:

$m$  – масса прибора, кг;  $f_0$  – собственная частота прибора в упаковке, Гц;

$K$  – жёсткость материала упаковки, Н/см

Используя рис. 6.29, по заданным значениям ускорения ( $j = 8 \text{ g}$ ) и предполагаемой высоты падения ( $h = 40 \text{ см}$ ), находим:  $f_0 \approx 4 \text{ Гц}$ ;  $\delta \approx 10 \text{ см}$ .

Используя рис. 6.30, по найденной собственной частоте ( $f_0 = 4 \text{ Гц}$ ) и заданному значению массы прибора ( $m = 70 \text{ кг}$ ) определяем необходимое для защиты прибора значение жёсткости материала упаковки:  $K \approx 430 \text{ Н/см}$ .

### 6.2.9. Общие рекомендации по защите РЭС от механических воздействий

Работа конструктора по обеспечению нормального функционирования РЭС в условиях воздействия вибраций начинается с сопоставления допустимых параметров вибраций для пассивных элементов аппаратуры (резисторы, конденсаторы и др.), транзисторы и микросхемы с требованиями технического задания на проектирование аппарата.

Если применяемые элементы удовлетворяют требованиям технического задания, то задача состоит в устранении резонансных колебаний конструктивных элементов (обеспечение режима, когда  $\mu \approx 1$ ).

Если же используемые элементы не удовлетворяют требованиям технического задания или возможны резонансные колебания конструктивных элементов аппарата, то следует применять виброизоляцию с последующей оценкой её эффективности (обеспечение режима, когда  $\mu < 1$ ).

Такой же подход при проектировании РЭС рекомендуется применять и для других видов механических воздействий – ударов, линейных нагрузок, акустических шумов.

Приведём пример оценочного расчёта РЭС с учётом механических воздействий.

#### Задача

Блок массой 6 кг установлен на четырёх виброизоляторах (нижний монтаж), жёсткость каждого из которых  $k = 2 \text{ Н/мм}$ . Внутри блока параллельно его основанию жёстко по контуру закреплена печатная плата из стеклотекстолита ( $c = 2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $k_m = 0,52$ ;  $\delta = 0,06$ ). Размеры платы  $200 \times 100 \times 1 \text{ мм}$ . Масса ЭРЭ и ИМС, размещенных на поверхности платы, составляет 60 г. Амплитуда и частотный диапазон воздействующей на блок вибрации:  $A_0 = 10 \text{ мм}$ ;  $f_n = 40 \text{ Гц}$ ;  $f_b = 80 \text{ Гц}$ . Определить возможность использования в составе конструкции элемента, размещенного на поверхности платы, если его собственная частота  $f_{0э} = 2 \text{ кГц}$ , а допустимая величина вибрационной нагрузки  $j_{\text{доп}} = 10 \text{ g}$ .

#### Решение

1. Поставленную задачу представляем в виде следующей физической модели (рис. 6.31).

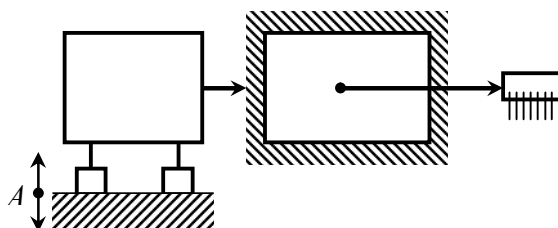


Рис. 6.31. Модель, соответствующая условию задачи

2. Определяем динамические характеристики элементов, включённых в модель:

а) собственную частоту блока на виброизоляторах подсчитываем по формуле (6.20):

$$f_{0\delta} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\Sigma}}{m}} = \frac{1}{6,28} \sqrt{\frac{4 \cdot 2 \cdot 10^3}{6}} \approx 5,8 \text{ Гц};$$

б) собственную частоту печатной платы находим по выражению (6.13):

$$f_{0п} = \frac{k_m k_b B h \cdot 10^4}{a^2} = \frac{0,52 \cdot 0,6 \cdot 234 \cdot 0,1 \cdot 10^4}{20^2} = 183 \text{ Гц};$$

в) собственная частота элемента:

$$f_{0э} = 2 \text{ кГц (по условию задачи).}$$

3. Определяем амплитуду колебаний блока на границах диапазона частот воздействующих вибраций:

$$A_{\delta} = \frac{A_0}{|1 - a^2|}, \text{ где } a = \frac{f}{f_{0\delta}}.$$

$$A_{\delta.н} = \frac{A_0}{\left|1 - \left(\frac{f_{н}}{f_{0\delta}}\right)^2\right|} = \frac{10}{\left|1 - \left(\frac{40}{5,8}\right)^2\right|} \approx 0,22 \text{ мм};$$

$$A_{\delta.в} = 0,05 \text{ мм}.$$

Эти величины амплитуд являются базовыми для оценки динамического состояния печатной платы.

4. Определяем амплитуды колебаний центра платы на границах диапазона частот воздействующих вибраций:

$$A_{ц.н} = \mu \cdot A_{\delta.н}.$$

В общем случае

$$\mu = \frac{\sqrt{\left(1 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2\right) a^2}}{\sqrt{(1 - a^2)^2 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 a^2}},$$

но так как в нашем случае значение  $f_0$  платы в несколько раз превышает значение частот воздействующих вибраций и ввиду малости  $\delta$ , можно принять  $\mu \approx 1$ .

Тогда

$$A_{ц.н} = \mu \cdot A_{\delta.н} = 0,22 \text{ мм};$$

$$A_{ц.в} = \mu \cdot A_{\delta.в} = 0,05 \text{ мм}.$$



5. Определяем величину вибрационной нагрузки в центре платы на границах диапазона частот воздействующих вибраций. Воспользовавшись формулой (6.2), находим

$$j_n = 4 \cdot 0,22 \cdot 10^{-3} \cdot 40^2 = 1,4 \cdot g;$$
$$j_b = 4 \cdot 0,05 \cdot 10^{-3} \cdot 80^2 = 1,28 \cdot g;$$

Сравнивая полученные значения вибрационной нагрузки с допустимой по условию задачи ( $j_{\text{доп}} = 10 g$ ), делаем вывод о возможности использования элемента в составе данной конструкции.

### 6.3. Тепловой режим конструкций РЭС

#### 6.3.1. Общие сведения

Тепловой режим РЭС характеризуется совокупностью температур всех его элементов. Основные тенденции эволюции современных РЭС в микроэлектронном исполнении:

- увеличение сложности и уменьшение габаритов;
- повышение требований к стабильности параметров.

Эти тенденции противоречивы, так как первая увеличивает напряженность теплового режима, а для выполнения второй надо его облегчать.

В процессе производства, хранения и эксплуатации РЭС могут подвергаться воздействию положительных и отрицательных температур, обусловленных влиянием окружающей среды, объекта установки и тепловыделением самого РЭС, например, на наземных подвижных объектах диапазон изменения температуры, где могут быть установлены РЭС, составляет  $-60...+60$  °С. Само РЭС является источником теплоты, так как его КПД менее 100 % (например для усилителя на транзисторах 50...60 %). Если эту энергию не рассеивать в элементах конструкции или окружающем пространстве, то повышается температура РЭС, нарушается его нормальный режим функционирования или наступает отказ. Температура влияет на многие параметры материалов, ЭРЭ, полупроводниковых приборов, ИМС.

Отвод тепла от РЭА может происходить за счёт: 1) теплопроводности, 2) конвекции и 3) теплового излучения. Эти виды теплообмена с той или иной эффективностью используются в конструкциях для отвода тепла от нагретых элементов к холодным и в окружающую среду.

*Теплопроводность* имеет место при передаче тепла внутри одного элемента или к другому элементу, находящемуся с ним в контакте. Этот вид теплопередачи определяется законом Фурье, согласно которому количество тепла  $P$ , передаваемого от нагретого тела к холодному, находится из выражения

$$C = \frac{\lambda}{l_T} (T_1 - T_2) S_T, \quad (6.32)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м·К;

$l_T$  – длина пути теплового потока, м;

$T_1, T_2$  – соответственно температуры нагретого и холодного тела, К;

$S_T$  – теплопроводящая площадь, м<sup>2</sup>.

Рекомендации по конструированию РЭС с учётом использования для отвода тепла теплопроводности:

- теплопроводящие пути выполнять короткими;
- в соединениях деталей обеспечивать тепловой контакт по возможно большей площади;
- соединяемые теплопроводящие элементы должны быть сжаты между собой, например с помощью винтовых соединений;
- теплоотводящие материалы должны иметь большие значения коэффициента теплопроводности.

Отвод тепла с использованием теплопроводности широко используется в конструкциях РЭС при монтаже мощных транзисторов, диодов, ИМС и других элементов. Они крепятся на специальных элементах, называемых радиаторами, или теплоотводящих шинах, от которых тепло, в свою очередь, передаётся на корпус РЭС и далее – в окружающую среду.

*Тепловое излучение* – передача тепловой энергии в виде электромагнитных колебаний. При попадании на другое тело энергия разогревает его, превращаясь снова в тепловую форму.

Количество тепла  $P_{л}$ , передаваемого излучением, определяется законом Стефана – Больцмана и в общем виде определяется соотношением

$$P_{л} = \lambda_{л} (T_{и} - T_{н}) S_{и}, \quad (6.33)$$

где  $\lambda_{л}$  – коэффициент передачи тепла излучения, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$T_{и}$  – температура излучающей поверхности, К;

$T_{н}$  – температура нагреваемой поверхности, К;

$S_{и}$  – площадь излучающей поверхности, м<sup>2</sup>.

Значение коэффициента  $\lambda_{л}$  зависит от степени черноты излучающей поверхности. Лучистая энергия не только поглощается поверхностью, но и отражается ею. Степень поглощения или отражения зависит от состояния поверхности.

Отвод тепла излучением также широко используется в конструкциях РЭС. Так, например, в целях защиты теплочувствительных элементов от перегрева устанавливают теплопоглощающие или теплоотражающие экраны. Первый имеет матовую, оксидированную поверхность чёрного цвета или окрашенную эмалевыми или масляными красками. Второй имеет глянцевую поверхность светлых тонов, зеркальную или полированную.

*Теплопередача конвекцией* происходит в среде воздуха, газа или жидкости, соприкасающейся с нагретыми поверхностями элементов конструк-

ции РЭС. Процесс теплопередачи конвекцией определяется законом Ньютона ( $P_k$  – количество тепла):

$$P_k = \lambda_k (T_n - T_c) S_k, \quad (6.34)$$

где  $\lambda_k$  – коэффициент теплопередачи конвекцией, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$T_n$  – температура нагретого тела, К;

$T_c$  – температура окружающей среды, К;

$S_k$  – площадь тепловыделяющей поверхности, м<sup>2</sup>.

Различают конвекцию свободную (естественную) и принудительную.

Для обеспечения заданного температурного режима модулей РЭС используются системы охлаждения, различающиеся:

- по способу организации системы (индивидуальная, групповая);
- по роду хладагента (воздух, жидкость);
- по способу движения хладагента (естественное, принудительное);
- по виду теплового контакта (с прижимными устройствами, с резьбовым соединением);
- по виду материала теплоотвода (металл, керамика);
- по конструктивному исполнению теплоотвода (односторонний, двусторонний, объёмный);
- по способу передачи теплоты в окружающую среду (без промежуточного теплоносителя и с ним).

### 6.3.2. Способы охлаждения РЭС

Подавляющее большинство РЭС (свыше 90 %) в настоящее время проектируются с использованием воздушного охлаждения. Воздушное охлаждение может быть естественным или принудительным (рис. 6.32).

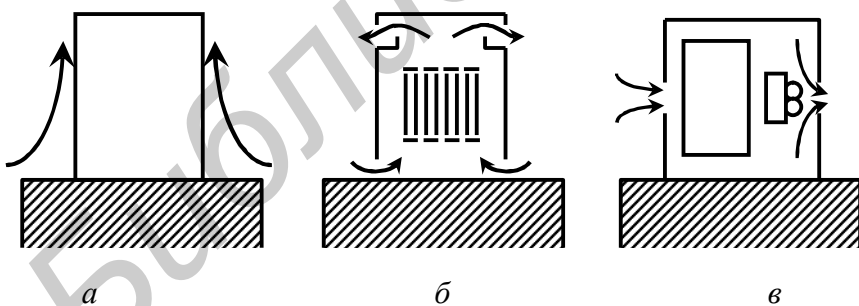


Рис. 6.32. Способы организации воздушного охлаждения:

*a* – естественное воздушное охлаждение;

*б* – естественная вентиляция; *в* – принудительная вентиляция

Принудительная вентиляция может быть вытяжной (рис. 6.32, *в*), приточной или приточно-вытяжной. Эти разновидности вентиляции различаются местом установки вентиляторов и их количеством.

Обычно в блоках с малой тепловой нагрузкой при естественном воздушном охлаждении или естественной вентиляции температура среды внутренних объёмов не превышает окружающую более чем на 30 °С. В более теплонагруженных блоках используют принудительную вентиляцию (см. рис. 6.32, *в*). При необходимости отбора тепла от особо тепловыде-

ляющих элементов, микросборок, модулей может быть использовано циркуляционное жидкостное охлаждение (рис. 6.33). Мощность тепловыделения модулей с жидкостным охлаждением существенно зависит от скорости прокачки жидкости и повышается с её увеличением.

Еще большей эффективностью теплоотвода характеризуются жидкостно-испарительные системы охлаждения. В таких системах охлаждение осуществляется за счёт циркуляции охлаждающей жидкости через радиаторы и рубашки, образованные в корпусах РЭС.

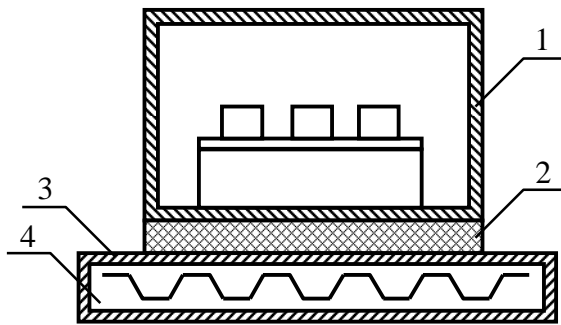


Рис. 6.33. Жидкостное охлаждение модуля РЭС:  
1 – модуль РЭС; 2 – слой теплопроводной пасты;  
3 – корпус охлаждаителя; 4 – каналы для прокачки жидкости

Для повышения эффективности теплоотвода корпус 1 выполняют ребристым. Кондуктивные теплостоки выполняют из алюминиевых шин 4, оптимальная толщина которых 0,5 мм. Применение кондуктивных теплостоков при естественном воздушном охлаждении позволяет снизить перегрев элементов в 2–3 раза.

В качестве теплостоков при малой мощности тепловых потерь может быть

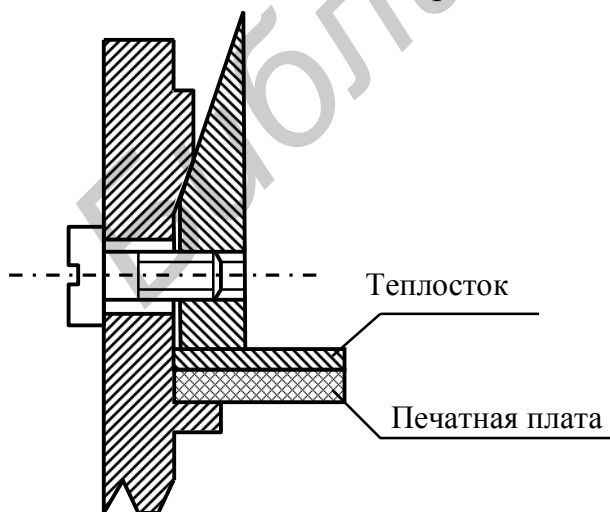


Рис. 6.35. Тепловой разъём с клиновым зажимом

характеризуются большой сложностью и стоимостью.

Для охлаждения РЭС на печатных платах с использованием микросборок и микросхем в герметизируемых корпусах применяются кондуктивные теплостоки в виде теплопроводных шин (рис. 6.34).

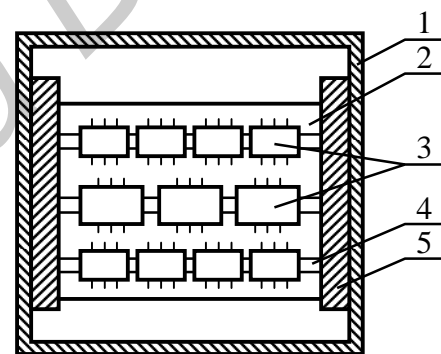


Рис. 6.34. Герметичный корпус РЭС с кондуктивными теплостоками:  
1 – корпус; 2 – печатная плата;  
3 – микросборки; 4 – шины теплостоков;  
5 – тепловые разъёмы

использована и медная фольга печатных плат. Для уменьшения теплового сопротивления корпуса микросхем и микросборок приклеивают к теплостокам. Дальнейшая передача тепла от теплостоков к корпусу может осуществляться через тепловые разъёмы 5 (см. рис. 6.34). В зарубежных и отечественных разработках применяются в основном конструкции тепловых разъёмов с клиновыми зажимами, позволяющими достаточно просто производить смену ячеек (рис. 6.35).

При выполнении модулей первого и нулевого уровней на бескорпусной элементной базе их герметизация может быть выполнена заливкой теплопроводным компаундом. В качестве таких компаундов рекомендованы компаунды марок К-5, ТФК-5, КТЭ-2, КТЭ-4.

Для охлаждения отдельных теплонагруженных элементов РЭС (микросхем, транзисторов, диодов и т.д.) наиболее простой и достаточно эффективный способ – использование радиаторов. Для систем воздушного охлаждения наибольшее распространение получили следующие разновидности радиаторов: пластинчатые, ребристые, игольчато-штыревые и др. (рис. 6.36).

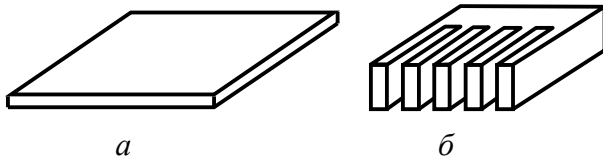


Рис. 6.36. Конструктивные разновидности радиаторов: *a* – пластинчатые; *b* – ребристые

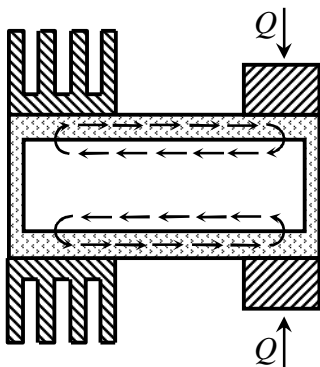


Рис. 6.37. Тепловая трубка

Для охлаждения отдельных теплонагруженных элементов РЭС могут использоваться и так называемые *тепловые трубки*, характеризующиеся простотой конструкции (рис. 6.37).

Они имеют герметичный вакуумированный объём. Внутренняя поверхность трубки покрыта слоем капиллярно-пористого материала. Часть внутреннего объёма заполнена насыщенным паром рабочей жидкости (ацетон, спирт и др.).

Теплопередача в тепловой трубке происходит за счёт поглощения тепла в результате парообразования в нагреваемой части трубки. Нагретый пар конденсируется в охлаждаемой части трубки и отдает тепло стенкам. Пополнение рабочей жидкости в испарительной части трубки происходит за счёт постоянного конденсата и передачи рабочей жидкости капиллярно-пористым материалам из охлаждающей части трубки к нагреваемой.

Для увеличения теплоотводящей способности таких трубок используется оребрение охлаждаемой части трубки.

В особых случаях могут быть использованы *термоэлектрические охладители на основе эффекта Пельтье*. Суть эффекта состоит в том, что при прохождении постоянного тока в цепи с двумя различными материалами на одном контактом спая тепло поглощается, а на другом – выделяется. Их достоинства: длительный срок службы, бесшумность работы, обратимость процесса охлаждения при изменении полярности источника питания, а недостатки: большие масса и габаритные размеры, необходим источник питания.

### 6.3.3. Оценочный выбор способа охлаждения РЭС

Блоки РЭС второго или третьего уровня представляют собой сложную систему элементов с множеством внутренних источников теплоты. Точное ана-

литическое описание таких объектов невозможно из-за громоздкости задачи и неточности исходных данных: мощности тепловых источников, теплофизических свойств материалов, их сложной геометрии и т.д. В связи с этими обстоятельствами на практике используются:

1) ориентировочный выбор способа охлаждения на ранней стадии проектирования РЭС;

2) приближённые методы анализа и расчёта теплового режима модуля РЭС.

Выбор способа охлаждения РЭС на ранней стадии проектирования целесообразно выполнить с помощью специальных графиков, характеризующих области целесообразного применения различных способов охлаждения (рис. 6.38).

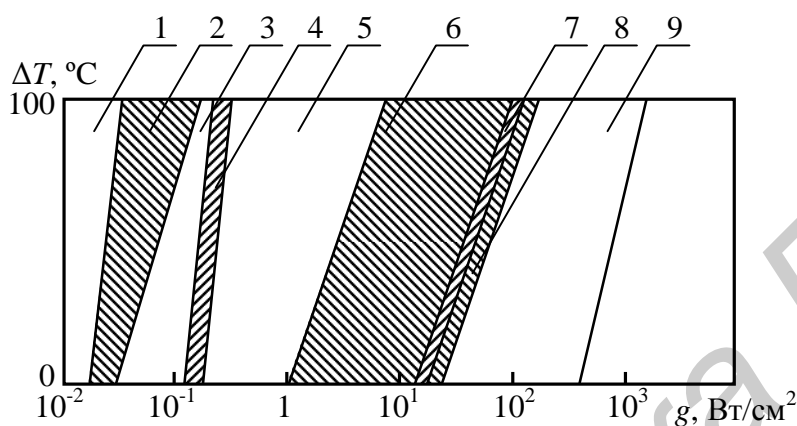


Рис. 6.38. Способы конвективного охлаждения в зависимости от плотности теплового потока ( $g$ ) и перегрева ( $\Delta T$ )

Различают два типа областей (см. рис. 6.38).

1. Области, в которых можно рекомендовать применение определенного способа охлаждения.

2. Области, в которых можно применять (по выбору) два или даже три способа охлаждения.

Области первого типа не заштрихованы и относятся к следующим способам охлаждения: 1 – естественное воздушное; 3 – принудительное воздушное; 5 – принудительное жидкостное; 9 – принудительное испарительное.

Области второго типа заштрихованы: 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.

Основным показателем, определяющим область целесообразного применения способа охлаждения, принимается значение плотности теплового потока, проходящего через поверхность теплообмена:

$$g = \frac{P}{S_{\Pi}}, \quad (6.35)$$

где  $P$  – суммарная мощность, рассеиваемая РЭС с поверхности теплообмена;

$S_{\Pi}$  – поверхность теплообмена РЭС.

Для блока прямоугольной формы

$$S_{\Pi} = 2[L_1 \cdot L_2 + (L_1 + L_2) \cdot L_3] \cdot K_V, \quad (6.36)$$

где  $K_V$  – коэффициент заполнения объема блока РЭС (см. подразд. 5.2).

$$K_V = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{V}, \quad (6.37)$$

где  $v_i$  – объем  $i$ -го компонента (части), входящего в состав блока;

$n$  – число компонентов блока;

$V$  – общий объем блока;

$L_1, L_2, L_3$  – размеры сторон корпуса блока РЭС.

Вторым показателем является минимально допустимый перегрев компонентов в блоке РЭС:

$$\Delta T_c = T_{\min} - T_c, \quad (6.38)$$

где  $T_{\min}$  – допустимая температура поверхности наименее теплостойкого элемента;

$T_c$  – температура окружающей среды.

Для естественного охлаждения  $T_c = T_{c \max}$ , т.е. соответствует максимальной температуре окружающей среды. Для принудительного охлаждения  $T_c = T_{\text{вх}}$ , т.е. соответствует температуре охлаждающего воздуха (или жидкости), используемого в системе охлаждения РЭС.

## 6.4. Защита конструкций РЭС от воздействия влаги

### 6.4.1. Источники и пути проникновения влаги

Конструкции РЭС подвергаются воздействию влаги в процессе производства, хранения и эксплуатации.

Источники влаги: 1) окружающая среда; 2) внутренняя среда гермоблоков; 3) материалы конструкций; 4) технологические жидкости (травители, моющие средства и др.).

*Окружающая среда.* Максимально возможное содержание влаги в воздухе зависит от температуры и давления. При понижении температуры влажного воздуха ниже уровня, соответствующего максимально возможному содержанию влаги (точке росы), избыток влаги выпадает в виде конденсата (росы).

*Внутренняя среда гермоблоков.* Причины наличия влаги:

- проникновение её через микropоры из внешней среды;
- невозможность полной осушки (без влагопоглотителя);
- наличие влаги в материалах конструкции.

*Материалы конструкции.* Особо интенсивные источники влаги – полимерные материалы (стеклотекстолит, гетинакс, клей, покрытия и т.д.). Они в процессе производства и хранения поглощают влагу из воздуха, а при нагреве в процессе эксплуатации выделяют её.

*Технологические жидкости* – это источники влаги и загрязнений, усиливающие действие влаги.

Поглощение влаги материалами конструкций РЭС обусловлено тем, что некоторые материалы имеют поры, размеры которых значительно превышают размеры молекул воды –  $3 \cdot 10^{-10}$  м; полимеры –  $10^{-9}$  м; керамика –  $10^{-5}$  м.

С металлами влага вступает в химическое взаимодействие, вызывающее коррозию. Действие влаги усиливается при контакте с сильно различающимися электрохимическими потенциалами, а также в местах сварных швов. Воздействие влаги на материалы и компоненты может привести к постепенным или внезапным отказам РЭС.

Увлажнение органических материалов приводит к следующим эффектам:

- увеличивается диэлектрическая проницаемость среды и потери (tgδ);
- уменьшаются объёмное сопротивление, электрическая и механическая прочность;
- изменяются геометрические размеры и формы;
- изменяются свойства смазок.

Возможные последствия:

- увеличение ёмкости конденсаторов и уменьшение добротности контуров;
- снижение пробивного напряжения диэлектриков;
- нарушение паяных и сварных швов;
- расслоение диэлектриков;
- разрушение защитных покрытий и т.д.

#### 6.4.2. Способы влагозащиты РЭС

Представление о способах (средствах) защиты РЭС от влаги даёт рис. 6.39.

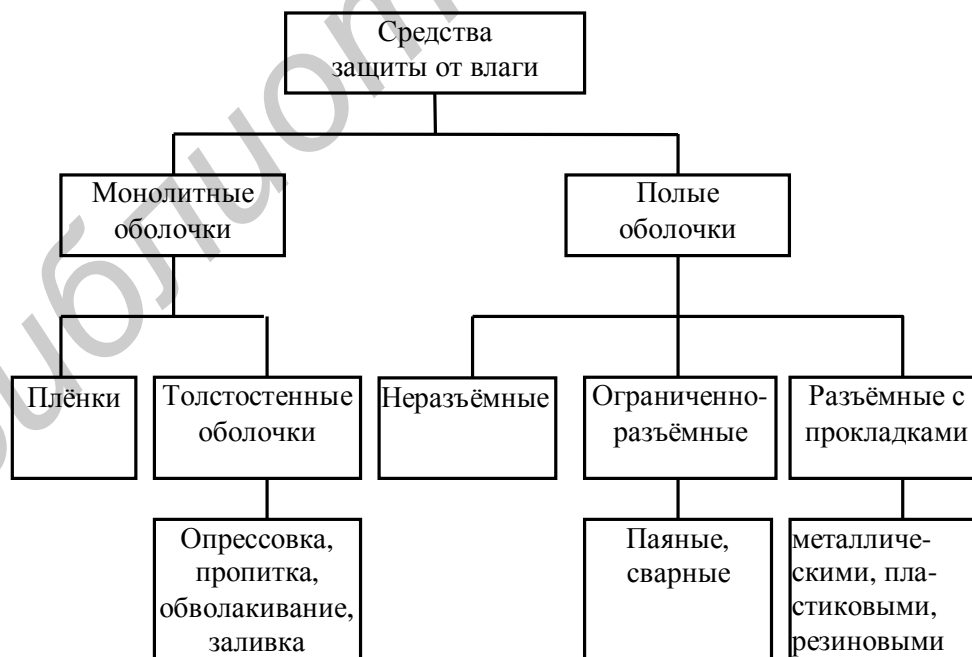


Рис. 6.39. Средства защиты РЭС от влаги

*Монолитные оболочки* составляют единое целое с защищаемым узлом.



*Полюе оболочки* не имеют контакта с защищаемыми компонентами – исключен тепловой контакт и химическое взаимодействие оболочки и компонентов. Они более надёжны, но имеют большие габариты, массу и стоимость.

Для защиты от коррозии несущих корпусных частей из металлов и сплавов применяют монолитные металлические покрытия. Они наносятся чаще всего гальваническим способом. Толщина покрытий составляет единицы–десятки микрометров (микрон).

В ряде случаев защитное покрытие для стали делают многослойным, например:

- слой меди 6...10 мкм;
- слой никеля 3...6 мкм (высокая твёрдость);
- слой хрома 0,5 мкм (гидрофобность).

Различают два вида покрытия – катодное и анодное.

Если электродный потенциал металла покрытия более положительный, чем основного металла, то покрытие называют катодным, а если наоборот – анодным. Значения электрохимических потенциалов некоторых металлов (для водной среды) приводятся в табл. 6.4. Катодные покрытия защищают основной металл лишь механически, изолируя его от внешней среды, а анодные – и электрохимически. Продукты разрушения заполняют поры, и процесс разрушения замедляется.

В конструкторской документации на изделие указывается материал покрытия, его толщина, последовательность нанесения слоёв. Например, медно-никелево-хромовое покрытие, служащее защитой от коррозии и декоративной отделкой, обозначается М24Н12Х (толщина меди 24 мкм, никеля – 12 мкм, хрома – до 1 мкм).

Металлические несущие конструкции защищают от влаги и с помощью лакокрасочных покрытий. Такие покрытия вследствие химической инертности обладают лучшими антикоррозийными свойствами, чем металлические, но механическая прочность и влагостойкость их меньше.

*Влагозащитные плёночные монолитные оболочки* имеют толщину 0,2...20 мкм. Требования к материалам защитных пленок:

- хорошие влагозащитные свойства;
- возможность работы в диапазоне температур (близость ТКЛР плёнки и защищаемого элемента, эластичность);
- хорошая адгезия к защищаемому компоненту.

Таблица 6.4  
Электрохимические потенциалы металлов (для водной среды)

Металл	Электрохимический потенциал, мВ
Серебро	+194
Медь	+140
Никель	+118
Алюминий	-169
Олово	-175
Свинец	-283
Сталь	-350
Кадмий	-574
Цинк	-823

Влагозащитные толстостенные монолитные оболочки могут выполнять и функцию несущей конструкции для внешних выводов (рис. 6.40).

Технологические процессы получения оболочек – пропитка, заливка, обволакивание и опрессовка. Используемые для этой цели материалы – пропиточные лаки, пенопласт, компаунды, пресс-материалы.

Влагозащитные полые оболочки применяют для защиты компонентов и узлов РЭС (ИС, микросборок), в качестве дополнительной защиты от влаги наземных РЭС на корпусных элементах, для бортовых РЭС на бескорпусных элементах, для аппаратуры диапазона СВЧ.

Применение полых оболочек позволяет:

- исключить механический контакт оболочек с защищаемым изделием;
- устранить химическое взаимодействие оболочки с защищаемым изделием;
- улучшить теплоотвод (при использовании оболочек, теплопроводность которых выше теплопроводности полимеров);
- повысить надёжность влагозащиты;
- обеспечить электромагнитное экранирование (при использовании металлической оболочки или из металлизированной керамики);
- ослабить паразитные связи при замене полимера воздухом.

Разновидности полых влагозащитных оболочек:

1. Полимерные полые оболочки. Состоят из пластмассового основания и приклеиваемой пластмассовой крышки. Их достоинство – дешевизна, а недостаток – слабая степень защиты. Применяются для наземных РЭС, работающих в отапливаемых помещениях.

2. Полые неразъёмные металлополимерные оболочки. Они характеризуются высокой эксплуатационной надёжностью и используются в качестве корпусов некоторых типов ИМС (рис. 6.41).

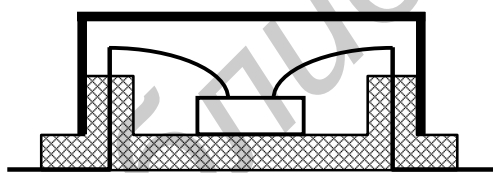


Рис. 6.41. Монолитный полимерный корпус ИМС

в подобных конструкциях корпусов ИС используют теплопроводящие шины.

3. Полые неразъёмные металлокерамические и металlostеклянные оболочки (рис. 6.42). Они также характеризуются высокой надёжностью, но и высокой стоимостью из-за использования дорогих и дефицитных материалов (молибден, палладий, золото, ковар).

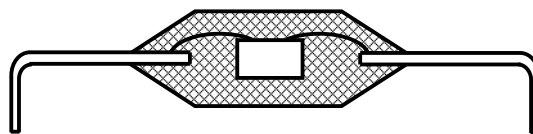


Рис. 6.40. Корпус ИМС на основе металлополимерной оболочки

Из-за низкой теплопроводности полимерных материалов для улучшения отвода тепла в подобных конструкциях корпусов ИС используют теплопроводящие шины.



Рис. 6.42. Конструкция металlostеклянного корпуса

Для обеспечения нормального функционирования подобных корпусов в широком диапазоне температур необходимо обеспечивать согласованные герметичные металлостеклянные спаи. Для стекла таким материалом для образования согласованного спаия является, например, ковар.

4. Ограниченно-разъёмные полые оболочки. Они представляют собой составной металлический корпус с паяным или сварным швом (рис. 6.43).

Сварка осуществляется по вершине кромок. При необходимости сварной шов можно удалить точением или фрезерованием с последующей повторной сваркой.

Использование *влагозащитных герметизирующих прокладок* упрощает герметизацию и разгерметизацию блока, что удобно как на этапе производства (при регулировке и настройке), так и на этапе эксплуатации (при ремонте). В качестве материала уплотняющих прокладок можно использовать полимеры (резина, пластмасса) и металлы (медь, алюминий, свинец). Достоинствами уплотняющих прокладок из пластмассы являются их низкая стоимость и стойкость в агрессивных средах, а недостатком – относительно низкая температурная стойкость. Металлические прокладки работоспособны в более широком диапазоне температур (от  $-250\dots$  до  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Пример конструктивного исполнения уплотняющей прокладки для корпуса РЭС показан на рис. 6.44.

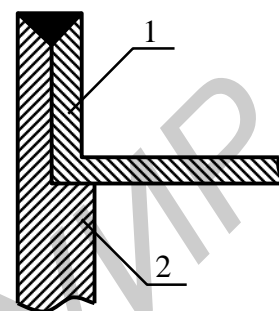


Рис. 6.43. Сварной шов:  
1 – корпус; 2 – крышка

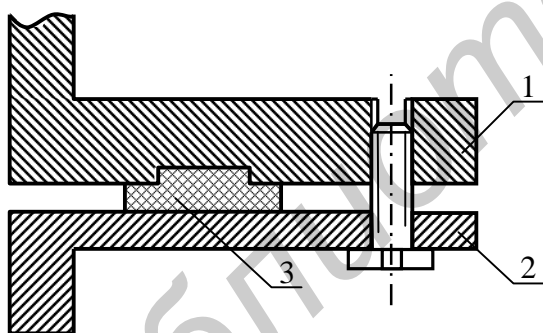


Рис. 6.44. Конструктивное исполнение уплотнения с помощью прокладки:  
1 – корпус блока; 2 – крышка; 3 – прокладка

С течением времени влага может проникать во внутреннюю среду гермоблока, а при понижении температуры – конденсироваться на компонентах РЭС и стенках гермоблока. Существует несколько способов, позволяющих снизить количество влаги в гермокорпусе или предотвратить её конденсацию:

- использование материалов с малым влагопоглощением;
- предварительная осушка внутренней среды гермоблока в процессе производства;

- осушка при эксплуатации с помощью специальных влагопоглотителей и др.

Наиболее эффективным способом осушки в период эксплуатации является использование влагопоглотителей, а наиболее перспективные вещества для этой цели – цеолиты, обладающие высокой скоростью поглощения влаги.

Внешние электрические связи герметичного блока обеспечиваются с помощью *металлостеклянных гермовводов* (рис. 6.45).

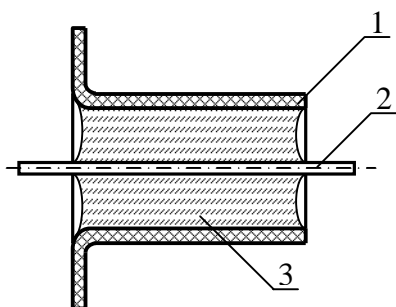


Рис. 6.45. Гермоввод:

1 – оболочка из ковара; 2 – проводник из ковара; 3 – стеклянный изолятор

- выбором наиболее экономичного метода защиты для данных условий эксплуатации и производства;

- уровнем типизации и унификации выбранного конструкторского решения;

- выбором материалов и способов их обработки.

Если РЭС эксплуатируется в отапливаемых помещениях (бытовая аппаратура, ЭВМ широкого применения), то наиболее экономичной является влагозащита компонентов и узлов с помощью полимерных монолитных оболочек при отсутствии общей герметизации устройства.

В случае повышенных требований к герметичности компонентов, интенсификации теплоотвода, обеспечения электромагнитного экранирования целесообразно использовать более дорогие металлокерамические или металлостеклянные оболочки. Корпус РЭС в этом случае может быть негерметичным. Если в составе РЭС имеются бескорпусные компоненты (обычно это бортовые РЭС), то изделие выполняется в виде гермоблока.

На выбор влагозащитной конструкции влияние оказывает и объём производства. Для единичного или мелкосерийного производства могут быть выбраны методы, не требующие дорогого оборудования и специального оснащения: обволакивание окунанием или пульверизацией, заливка, пропитка. При массовом производстве необходимо использовать высокопроизводительные методы: опрессовку полимерами, обработку деталей штамповкой, прессованием, литьём под давлением. Технологичность влагозащитной конструкции повышается при использовании типовых конструкций, технологические процессы изготовления которых хорошо отработаны [4].

Они впаиваются в посадочные места корпуса по оболочке 1. Высокочастотные соединители оплавляются по периметру, а низкочастотные – вводятся с помощью полимерной герметизации (рис. 6.46).

Трудоёмкость обеспечения влагозащиты составляет 20...40 % общей трудоёмкости изготовления РЭС.

*Технологичность влагозащитной конструкции определяется:*

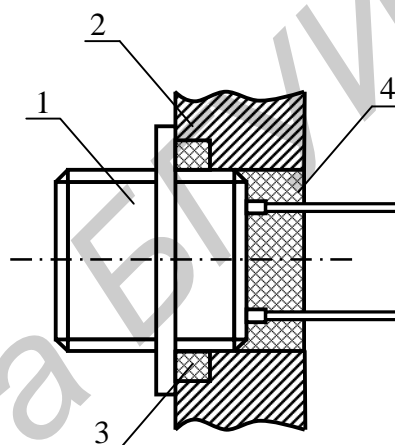


Рис. 6.46. Вариант герметизации вилки соединителя с помощью уплотнительной прокладки и компаунда:

1 – вилка соединителя; 2 – корпус блока; 3 – уплотнительная прокладка; 4 – компаунд

## 7. НАДЁЖНОСТЬ РЭА И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

### 7.1. Надёжность как свойство РЭА и элементов

*Теория надёжности* – это научная дисциплина, занимающаяся вопросами оценки и обеспечения надёжности технических изделий.

*Основными понятиями теории надёжности* являются понятия «надёжность» и «отказ». Под *надёжностью* понимают свойство изделия сохранять в течение заданного времени в пределах установленных норм значения функциональных параметров при определённых условиях (заданных режимах и условиях эксплуатации, технического обслуживания, хранения и транспортирования). Под функциональными здесь понимают такие параметры, которые характеризуют способность изделия выполнять предписанные ему функции.

В теории и практике надёжности технических изделий широко пользуются понятием *наработка*, под которой понимают продолжительность работы изделия, выраженную в часах, циклах переключения или других единиц в зависимости от вида и функционального назначения изделия. Например, для интегральной микросхемы наработка выражается в часах, для переключателя – в циклах переключения, для счётчика бета-излучения – в импульсах и т.д. Если изделие работает с перерывами, то в суммарную наработку включаются только периоды работы, т.е. периоды использования изделия по назначению.

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

Нередко под надёжностью в узком смысле слова (особенно на бытовом уровне) понимают безотказность изделия.

С точки зрения восстанавливаемости различают восстанавливаемые и невосстанавливаемые изделия. *Восстанавливаемые* изделия в случае возникновения отказа подвергаются ремонту и далее снова используются по назначению. *Невосстанавливаемые* изделия не подлежат либо не поддаются ремонту по техническим или экономическим соображениям.

В теории надёжности различают надёжность устройств и надёжность входящих в него элементов. Устройства обычно являются изделиями восстанавливаемыми. Элементы, как правило, изделия невосстанавливаемые.

Многие понятия и определения теории надёжности базируются на таких понятиях, как работоспособность и безотказность [11, 13, 14].

*Безотказность* – свойство изделия непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки. Под работоспособным состоянием (кратко – *работоспособностью*) понимают состояние изделия, при котором оно способно выполнять предписанные ему функции, имея значения выходных параметров в пределах норм, оговоренных в технической документации.

*Долговечность* – свойство изделия сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. О долговечности как составляющей надёжности судят по таким понятиям, как ресурс и срок службы.

Под *ресурсом* понимают суммарную наработку изделия от начала эксплуатации до перехода в предельное состояние при необходимости с перерывами для технического обслуживания и ремонта. Под *предельным состоянием* понимают такое состояние изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация или ремонт невозможны либо нецелесообразны по техническим, экономическим и другим соображениям. Как правило, для одного и того же изделия указывают несколько критериев наступления предельного состояния. И если «сработал» хотя бы один критерий, то для изделия уже имеет место предельное состояние. В технической документации обычно указывают, что понимают под предельным состоянием. Типичными критериями предельных состояний РЭА могут быть:

- снижение физических и (или) электрических свойств материалов конструкции до предельно допустимого уровня;
- механический износ ответственных функциональных узлов до предельно допустимого уровня;
- снижение показателя безотказности, например наработки на отказ ниже допустимого уровня;
- превышение уровня текущих или суммарных затрат на ремонт;
- другие признаки, определяющие экономическую нецелесообразность дальнейшей эксплуатации или ремонта.

Отметим, что для элементов РЭА как изделий невосстанавливаемых отказ (полная или частичная потеря работоспособности) является критерием наступления предельного состояния. Однако для элементов дополнительно могут указываться и другие критерии наступления предельного состояния: например, превышение интенсивности отказов (как показателя безотказности) допустимого уровня, появление сквозного отверстия (из-за развития процессов коррозии) в металлическом корпусе элемента.

Под *сроком службы* понимается не суммарная наработка, а календарная продолжительность от начала эксплуатации изделия до перехода в предельное состояние.

*Ремонтпригодность* – свойство изделия, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта. Для элементов РЭА, изделий, как правило, невосстанавливаемых, это свойство не имеет физического смысла и не используется, и не рассматривается.

*Сохраняемость* – свойство изделия сохранять в заданных пределах значения параметров в течение и после хранения и (или) транспортирования. Принимаются во внимание только параметры, характеризующие способность изделия выполнять требуемые функции, т.е. функциональные параметры.

О сохраняемости как свойстве изделий и составляющей надёжности судят по сроку сохраняемости и (или) сроку хранения. Срок сохраняемости в общем случае может включать две составляющие: срок хранения ( $t_{xp}$ ) и время транспортирования ( $t_{tp}$ ). Во многих случаях  $t_{tp} \ll t_{xp}$ , поэтому в инженерных приложениях о сроке сохраняемости, если он не указан, судят с помощью срока хранения.

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

Под *наработкой до отказа* понимают суммарную наработку изделия от момента вступления в работу (эксплуатацию) до возникновения первого отказа.

В настоящее время существуют различные схемы классификации отказов. Одна из схем, широко используемая в теории и практике надёжности РЭУ, представлена в табл. 7.1 [11].

Таблица 7.1

Классификация отказов РЭУ и их элементов

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

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

Под *постепенным* (ранее называемым также параметрическим) понимают отказ, возникающий в результате постепенного, обычно непрерывного и монотонного изменения значения одного или нескольких функциональных параметров изделия и ухода их за пределы норм, указанных в технической документации.

Чёткой границы между внезапным и постепенным отказами провести не удается. В [12] дано следующее определение внезапного отказа: это отказ, наступление которого не может быть предсказано предварительным контролем или диагностированием.

*Сбой (временный отказ)* – это самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора, например перезагрузкой ЭВМ.

*Перемежающийся отказ* – это многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера.

Под *явным* понимают отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения по назначению.

Под *неявным* (скрытым) отказом понимают отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными средствами и методами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностирования.

*Независимым* называют отказ, не обусловленный другими отказами.

*Зависимым* называют отказ, обусловленный другими отказами.

Под *конструктивным* понимают отказ, возникающий по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования.

Под *производственным* понимают отказ, связанный с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта.

Под *эксплуатационным* понимают отказ, возникающий по причине, связанной с нарушением установленных правил или условий эксплуатации.

Под *деградационным* понимают отказ, обусловленный естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

Распределение числа отказов РЭА в зависимости от ошибок проектирования, производства и неверных действий оператора показано на рис. 7.1.

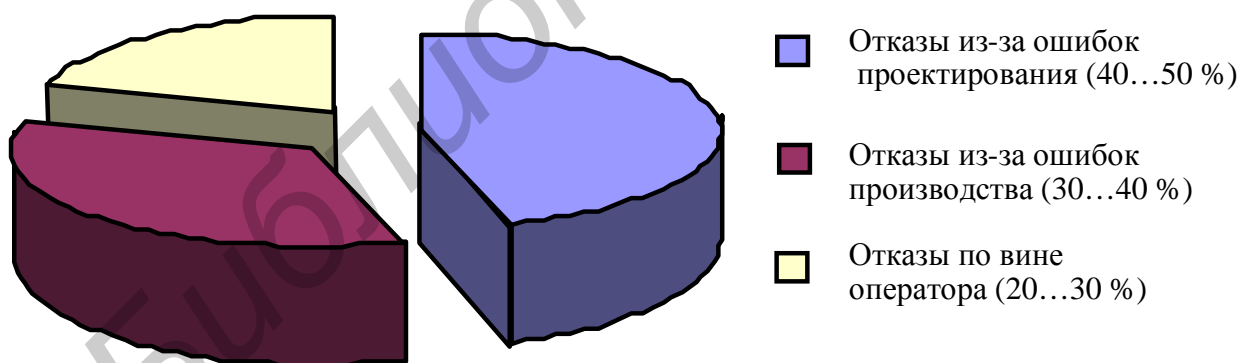


Рис. 7.1. Распределение отказов РЭА

Влияние различных причин на число конструктивных отказов РЭА представлено в табл. 7.2.



Распределение отказов в зависимости от ошибок проектирования

Причина отказа	Примерное число отказов, %
Недостатки электрических схем	До 30
Недостатки механической конструкции	До 10
Неправильный учёт возможностей оператора	Нет данных
Неправильный выбор элементов (по условиям эксплуатации, применения и т.п.)	10
Неправильный выбор электрических режимов работы элементов	10

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

По своей физической сущности отказы элементов и устройств являются событиями случайными. Поэтому для количественного описания отказов и вообще показателей надёжности пригодны приёмы теории вероятностей [14].

Анализируя отказы, нетрудно установить, что случайной величиной, описывающей отказы, является время до отказа (в общем случае наработка до отказа).

Установлено, что *время до отказа*, или, что то же самое, *время безотказной работы*, неплохо описывается следующими законами распределения:

- а) экспоненциальным;
- б) законом Вейбулла;
- в) нормальным;
- г) логарифмически нормальным.

Для экспоненциального закона плотность распределения времени до отказа задаётся выражением (рис.7.2)

$$w(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \lambda > 0, t \geq 0, \quad (7.1)$$

где  $\lambda$  – параметр распределения (модели).

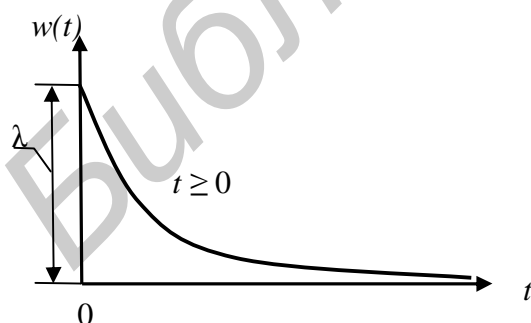


Рис. 7.2 Экспоненциальное распределение времени до отказа

В теории и практике надёжности РЭУ часто употребляют термин «экспоненциальный закон надёжности», имея в виду, что время до отказа распределено по экспоненциальной модели.

Проводя испытания элементов или устройств на надёжность и фиксируя время до отказа каждого экземпляра, получим ряд значений случайной величины – времени до

отказа. Общепринятыми приёмами математической статистики [11] для времени до отказа можно построить гистограмму распределения (рис. 7.3) и попытаться восстановить вид функции  $w(t)$ .

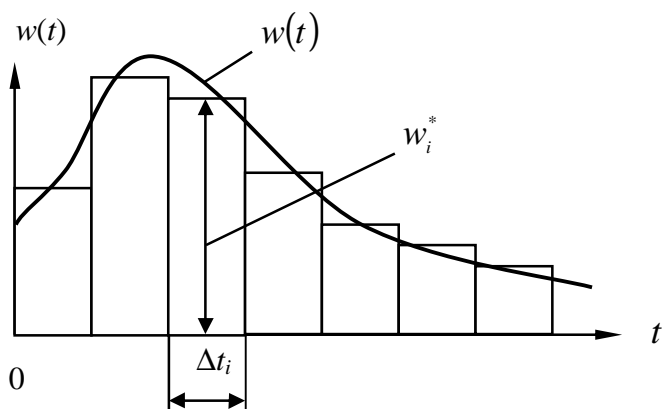


Рис.7.3. Гистограмма распределения времени до отказа

Величины  $w_i^*$  определяют по формуле

$$w_i^* = \frac{n(\Delta t_i)}{N \cdot \Delta t_i}, \quad (7.2)$$

где  $N$  – общее число испытываемых изделий;

$n(\Delta t_i)$  – число изделий, отказавших на интервале времени  $\Delta t_i$ ;

$\Delta t_i$  – ширина  $i$ -го временного интервала.

С увеличением количества испытываемых изделий  $N$  и уменьшением ширины интервалов  $\Delta t_i$  гистограмма все более и более приближается к плотности распределения  $w(t)$ .

Характеристика  $w(t)$  на практике не находит широкого применения в качестве показателя надёжности изделий, однако без знания этой характеристики трудно определить интересующие нас показатели безотказности.

## 7.2. Показатели надёжности РЭА и их элементов

Надёжность является комплексным свойством изделия. Для описания различных сторон этого свойства на практике пользуются *показателями надёжности*, представляющими собой количественные характеристики одного или нескольких свойств, определяющих надёжность изделия.

Используют единичные и комплексные показатели надёжности.

Под *единичным* понимают такой показатель, который характеризует одно из свойств, составляющих надёжность изделия.

*Комплексный* показатель характеризует несколько свойств из числа, составляющих надёжность изделия: безотказность, ремонтпригодность, долговечность, сохраняемость.

Для количественного описания различных сторон надёжности как свойства обычно используют несколько групп показателей:

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

Основные единичные показатели надёжности, используемые в инженерной практике, приведены на рис. 7.4. На этом рисунке показатели надёжности записаны с помощью своих условных обозначений. Пояснение условных обозначений показателей надёжности приведено в табл. 7.3.

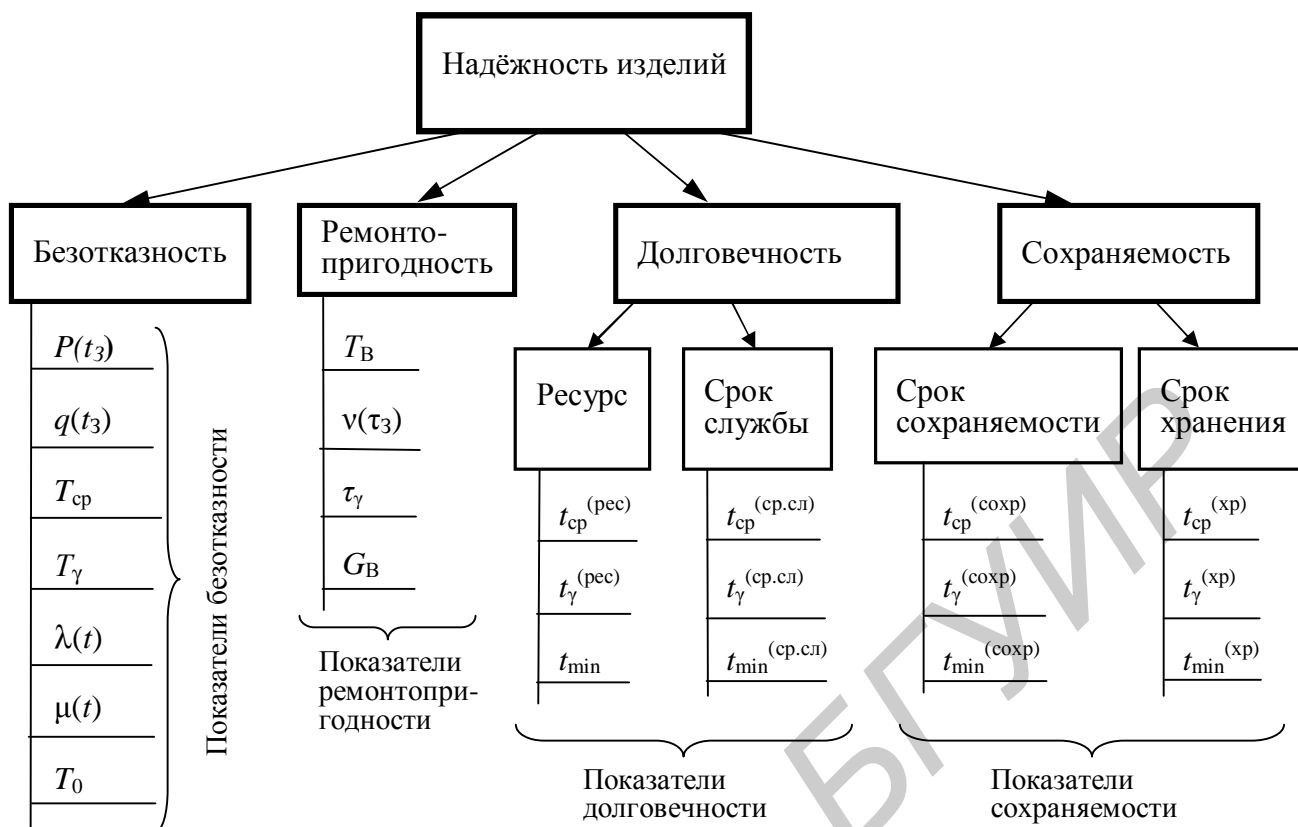


Рис. 7.4. Основные составляющие и показатели надёжности

Таблица 7.3

Пояснения показателей надёжности

Обозначение показателя	Пояснение показателя надёжности
<b>Показатели безотказности</b>	
$P(t_3)$	Вероятность безотказной работы за заданное (интересующее) время $t_3$
$q(t_3)$	Вероятность отказа за заданное время $t_3$
$T_{cp}$	Средняя наработка до отказа. Если наработка выражается временем, то показатель называют средним временем безотказной работы
$T_\gamma$	Гамма-процентная наработка до отказа (обычно $\gamma \geq 90\%$ )
$\lambda(t)$	Интенсивность отказов, в общем случае является функцией времени. Используется в качестве основной справочной характеристики безотказности элементов, причём принимается $\lambda(t) = \lambda_0 = \text{const}$ при наработке, равной $t_n$ (указывается конкретное значение $t_n$ в часах)
$\mu(t)$	Параметр потока отказов. Показатель имеет физический смысл только для восстанавливаемых РЭУ. Представляет отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого устройства за достаточно малое время к значению этого времени
$T_0$	Средняя наработка на отказ, кратко – наработка на отказ. Имеет физический смысл только для восстанавливаемых РЭУ. Представляет собой среднее время безотказной работы между двумя соседними отказами одного и того же изделия. От показателя $T_{cp}$ отличается только предлогом «на»

Обозначение показателя	Пояснение показателя надёжности
<b>Показатели ремонтпригодности</b>	
$T_B$	Среднее время восстановления РЭУ. Представляет математическое ожидание времени восстановления
$v(\tau_3)$	Вероятность восстановления РЭУ за заданное время $\tau_3$
$\tau_\gamma$	Гамма-процентное время восстановления (обычно $\gamma \geq 90\%$ )
$G_B$	Средние затраты на восстановление РЭУ. Показывает, сколько в среднем потребуется денежных средств на восстановление работоспособности РЭУ
<b>Показатели долговечности</b>	
$t_{cp}^{(pec)}$	Средний ресурс изделия. Представляет собой математическое ожидание ресурса изделий рассматриваемого типа
$t_\gamma^{(pec)}$	Гамма-процентный ресурс (обычно $\gamma \geq 90\%$ )
$t_{min}$	Минимальная наработка. Характеризует ресурсные возможности изделия, считают, что $t_{min}$ соответствует значению $t_\gamma^{(pec)}$ при $\gamma = 99,99\%$
$t_{cp}^{(cp.cл)}$	Средний срок службы изделия. Представляет собой математическое ожидание срока службы изделий рассматриваемого типа
$t_\gamma^{(cp.cл)}$	Гамма-процентный срок службы (обычно $\gamma \geq 90\%$ )
$t_{min}^{(cp.cл)}$	Минимальный срок службы. Считают, что $t_{min}^{(cp.cл)}$ соответствует гамма-процентному сроку службы $t_\gamma^{(cp.cл)}$ при $\gamma = 99,99\%$
<b>Показатели сохраняемости</b>	
$t_{cp}^{(coxp)}$	Средний срок сохраняемости изделия. Представляет собой математическое ожидание срока сохраняемости изделий рассматриваемого типа
$t_\gamma^{(coxp)}$	Гамма-процентный срок сохраняемости (обычно $\gamma \geq 90\%$ )
$t_{min}^{(coxp)}$	Минимальный срок сохраняемости. Считают, что $t_{min}^{(coxp)}$ соответствует значению $t_\gamma^{(coxp)}$ при $\gamma = 99,99\%$
$t_{cp}^{(xp)}$	Средний срок хранения изделия. Представляет собой математическое ожидание срока хранения изделий рассматриваемого типа
$t_\gamma^{(xp)}$	Гамма-процентный срок хранения (обычно $\gamma \geq 90\%$ )
$t_{min}^{(xp)}$	Минимальный срок хранения. Считают, что $t_{min}^{(xp)}$ соответствует гамма-процентному сроку хранения $t_\gamma^{(xp)}$ при $\gamma = 99,99\%$

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

$$P(t_3) = \text{Вер} \{T \geq t_3\}, \quad (7.3)$$

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

Запись «Вер» здесь и далее означает «вероятность».

Причём здесь и далее слова «за время  $t_3$ » означают интервал времени от 0 до  $t_3$  включительно.

Безотказная работа изделия и его отказ – события противоположные, составляющие полную группу событий. Поэтому для вероятности отказа изделия за произвольное время  $t$  можно записать как

$$q(t) = 1 - P(t). \quad (7.4)$$

С другой стороны, вероятность отказа можно представить как

$$q(t) = \text{Вер}\{T < t\}. \quad (7.5)$$

Рассматривая выражение (7.5) с учётом определений, вводимых в теорию вероятностей, можно прийти к выводу, что

$$q(t) = F(t), \quad (7.6)$$

где  $F(t)$  – функция распределения (интегральный закон) времени до отказа, найденная для времени  $t$ .

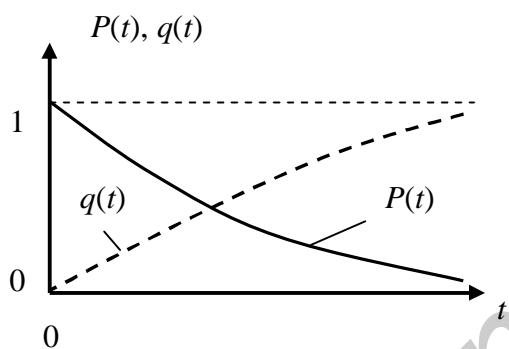


Рис.7.5. Графики функций  $P(t)$  и  $q(t)$

Графики функций  $P(t)$  и  $q(t)$  приведены на рис. 7.5.

Зависимость вероятности безотказной работы от времени называют функцией надёжности. Эта функция имеет три свойства.

1.  $P(t = 0) = 1$ , т.е. предполагается, что в момент времени  $t = 0$  изделие работоспособно.

2.  $P(t = \infty) = 0$ . Это означает, что при длительной эксплуатации изделие обязательно откажет.

3.  $P(t)$  – невозрастающая функция. В противном случае не было найдено физического объяснения её возрастанию.

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

$$P(t_3) = \int_{t_3}^{\infty} w(t) dt, \quad (7.7)$$

а вероятность отказа за время  $t_3$

$$q(t_3) = \int_0^{t_3} w(t) dt. \quad (7.8)$$

Геометрическая интерпретация выражений (7.7) и (7.8) понятна из рис. 7.6.

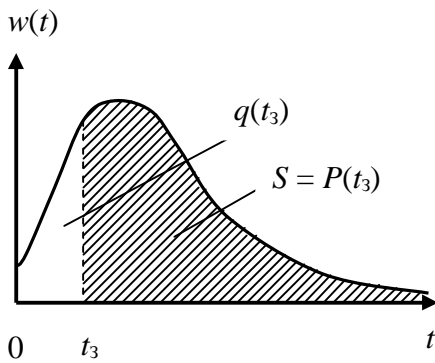


Рис. 7.6. К определению вероятности безотказной работы и вероятности отказа

В случае экспоненциального распределения времени безотказной работы, т.е. когда

$$w(t) = \lambda e^{-\lambda t},$$

с использованием выражения (7.7) можно получить

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (7.9)$$

где  $\lambda$  – параметр экспоненциального распределения для рассматриваемого изделия.

Формулой (7.9) широко пользуются в инженерных расчётах. Она также известна под названием «экспоненциальный закон надёжности».

По результатам испытаний вероятность безотказной работы за время  $t_3$  и вероятность отказа за время  $t_3$  можно определить по формулам

$$P(t_3) = \frac{N - n(t_3)}{N}; \quad q(t_3) = \frac{n(t_3)}{N}, \quad (7.10)$$

где  $N$  – количество изделий, поставленных на испытания;

$n(t_3)$  – количество изделий, отказавших за время испытаний, равное  $t_3$ .

*Интенсивность отказов.* Под интенсивностью отказов изделий для времени  $t$  понимают значение условной плотности распределения времени до отказа при условии, что до рассматриваемого момента времени  $t$  отказов не было. С использованием результатов испытаний *интенсивность отказов* численно можно определить как

$$\lambda_i^* = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{\text{ср } i} \cdot \Delta t_i}, \quad (7.11)$$

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

$\Delta t_i$  – ширина  $i$ -го временного интервала;

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

Рассчитанное по формуле (7.11) значение  $\lambda_i^*$  относится к любой точке  $i$ -го рассматриваемого интервала.

Зависимость интенсивности отказов от времени в технике называется  $\lambda$ -характеристикой. Типичный вид  $\lambda$ -характеристики РЭУ приведен на рис. 7.7.

На  $\lambda$ -характеристике можно четко выделить три области.

1. *Период приработки.* Характеризуется повышенным значением интенсивности отказов (большим числом отказов) из-за грубых дефектов производства. На практике обычно стремятся уйти из этой области ( $A$  на рис. 7.7), орга-

низу в условиях производства термоэлектротренировку, технологический прогон и т.п. Продолжительность области  $A$  для РЭУ составляет десятки-сотни часов. Оптимальной является длительность технологического прогона, соответствующая окончанию периода приработки (точка  $B$  на рис. 7.7).

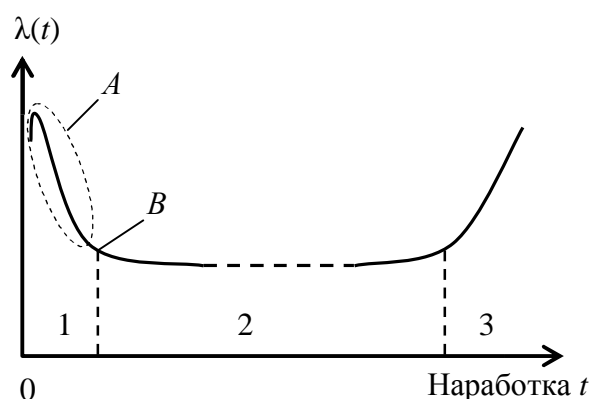


Рис. 7.7. Типичный вид  $\lambda$ -характеристики РЭУ

на этом этапе нецелесообразна.

Между характеристиками изделия  $w(t)$ ,  $P(t)$  и  $\lambda(t)$  существует следующая связь [11]:

$$\lambda(t) = \frac{w(t)}{P(t)}. \quad (7.12)$$

*Среднее время безотказной работы.* Надёжность однотипных РЭУ или элементов с точки зрения продолжительности их работы до первого отказа можно оценить *средним временем безотказной работы*, под которым понимают математическое ожидание времени безотказной работы. В общем случае рассматриваемый показатель называют *средней наработкой до отказа*, так как он представляет собой математическое ожидание (среднее значение) случайной величины — наработки до отказа. Этот показатель может использоваться для любых изделий: восстанавливаемых и невосстанавливаемых.

По результатам испытаний среднее время безотказной работы  $T_{\text{cp}}$  может быть определено как

$$T_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N}, \quad (7.13)$$

где  $T_i$  — время безотказной работы  $i$ -го экземпляра рассматриваемого вида изделия.

При аналитическом определении  $T_{\text{cp}}$  пользуются выражением

$$T_{\text{cp}} = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (7.14)$$

где  $P(t)$  — вероятность безотказной работы за время  $t$ .

2. *Период нормальной эксплуатации.* Характеризуется примерным постоянством во времени интенсивности отказов. Инженерные расчёты надёжности устройств обычно выполняют для этого периода. Продолжительность данного периода составляет тысячи–десятки тысяч часов.

3. *Область старения.* Характеризуется повышенным числом отказов ввиду старения и износа составных частей изделия. Эксплуатация изделия

*Гамма-процентная наработка до отказа.* Под ней понимают наработку, в течение которой отказ в изделии не возникнет с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах, т.е. это минимальное значение наработки до отказа, которую будут иметь  $\gamma$  процентов изделий данного вида. Например, запись в технической документации: «90-процентная наработка до отказа составляет не менее 250 ч» означает, что у 90 % изделий данного вида в течение суммарной наработки, равной 250 ч, отказ не возникнет.

*Наработка на отказ (средняя наработка на отказ).* Предположим, что

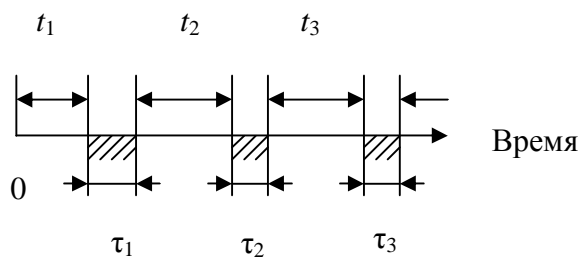


Рис. 7.8. Процесс функционирования РЭУ:  
 $t_1, t_2, t_3$  – интервалы безотказной работы РЭУ;  
 $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  – интервалы по устранению отказов

РЭУ (один экземпляр) эксплуатируется в течение определенного календарного периода. Возникающие при эксплуатации отказы устраняются, и изделие снова используется по назначению. Этот процесс продолжается до окончания рассматриваемого календарного периода. Изобразим процессы функционирования и устранения отказов РЭУ на временной оси (рис.7.8).

Тогда наработку на отказ можно определить как

$$T_0 = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{m}, \quad (7.15)$$

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

Показатель  $T_0$  имеет смысл только применительно к восстанавливаемым устройствам. Его более полно называют *средней наработкой на отказ*, что понятно из выражения (7.15).

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

$$T_{\gamma=90\%} \approx 0,1T_0; \quad T_{\gamma=99\%} \approx 0,01T_0; \quad T_{\gamma=99,9\%} \approx 0,001T_0. \quad (7.16)$$

*Вероятность восстановления РЭУ.* Под вероятностью восстановления устройства за заданное время  $\tau_3$  понимают вероятность вида

$$v(t_3) = \text{Вер}\{T \leq t_3\}, \quad (7.17)$$

где  $T$  – случайное время восстановления устройства.



Формулы расчёта значений вероятности  $v(\tau_3)$  зависят от закона распределения времени восстановления и определяются выражением

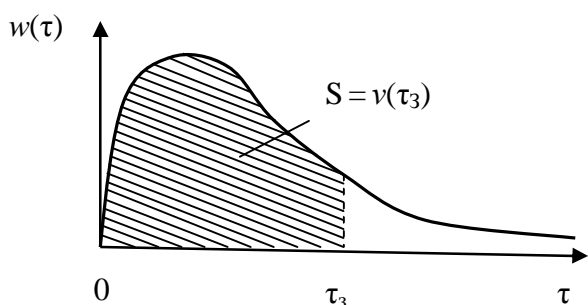


Рис. 7.9. К вопросу об определении величины  $v(\tau_3)$

$$v(t_3) = \int_0^{t_3} w(t) dt, \quad (7.18)$$

где  $w(\tau)$  — плотность распределения времени восстановления устройства.

Графическую интерпретацию выражения (7.18) можно понять из рис. 7.9.

*Среднее время восстановления.*

Под ним понимают математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния РЭУ после отказа. Среднее время восстановления определяется по аналогии с показателем  $T_0$ . Пусть за определенный календарный период эксплуатации РЭУ произошло  $m$  отказов. На восстановление РЭУ после возникновения  $i$ -го отказа затрачивалось время  $\tau_i$  (см. рис. 7.8). Тогда среднее время восстановления РЭУ может быть подсчитано как

$$T_B = \frac{\sum_{i=1}^m \tau_i}{m}. \quad (7.19)$$

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

*Гамма-процентное время восстановления.* Под ним понимают время восстановления, гарантируемое с вероятностью «гамма», выраженной в процентах. Например, запись в технической документации «95-процентное время восстановления составляет не более 5 ч» означает, что для устройств данного типа в 95 % случаев время восстановления составит не более 5 ч.

*Средние затраты на восстановление РЭУ.* Этот показатель иллюстрирует, сколько в среднем потребуется денежных средств на восстановление работоспособности РЭУ.

*Гамма-процентный ресурс.* Это ресурс, который обеспечивается с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах, т.е. по истечении суммарной наработки, равной значению ресурса  $t_\gamma^{(pec)}$ , у гамма процентов изделий данного вида предельное состояние ещё не наступит.

При отсутствии в технической документации гамма-процентного ресурса минимальную наработку  $t_{min}$ , указанную в технической документации, приравнивают к 99,99-процентному ресурсу.

*Гамма-процентный срок службы.* Это срок службы, который обеспечивается с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах, т.е. по истечении суммарного календарного времени, равного значению  $t_\gamma^{(cp.cl)}$ , у гамма процентов изделий данного вида предельное состояние ещё не наступит.

При отсутствии в технической документации гамма-процентного срока службы *минимальный срок службы*  $t_{\min}^{(cp.cл)}$  приравнивают к 99,99-процентному сроку службы.

*Гамма-процентный срок сохраняемости.* Это срок сохраняемости, достигаемый изделием с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах, т.е. срок сохраняемости, который выдержат гамма процентов изделий данного вида.

При отсутствии в технической документации гамма-процентного срока сохраняемости *минимальный срок сохраняемости*  $t_{\min}^{(соxp)}$  приравнивают к 99,99-процентному сроку сохраняемости.

В технической документации на изделия иногда вместо показателей, описывающих срок сохраняемости, приводятся показатели, описывающие *срок хранения*: средний срок хранения, гамма-процентный срок хранения, минимальный срок хранения. Эти показатели практически совпадают с аналогичными показателями, которые указывают на срок сохраняемости, так как составляющая транспортирования обычно невелика по сравнению с временем хранения.

Эксплуатационно-техническими показателями, связанными с безотказностью изделий, являются гарантийная наработка и гарантийный срок эксплуатации. *Гарантийная наработка (гарантийный срок эксплуатации)* – это такая суммарная наработка (срок эксплуатации) изделия, в течение которой изготовитель обязуется безвозмездно устранять производственные дефекты и возникающие отказы при условии соблюдения правил эксплуатации.

Эксплуатационно-техническими показателями, связанными с долговечностью изделий являются назначенный ресурс, назначенный срок службы, установленный ресурс, установленный срок службы.

*Назначенный ресурс (назначенный срок службы)* это такой ресурс (срок службы), при достижении которого изделие снимается с эксплуатации независимо от его технического состояния. Эти показатели устанавливают для устройств, на которые возлагаются ответственные функции.

*Установленный ресурс (установленный срок службы)* это такой ресурс (срок службы), который гарантируется с вероятностью гамма, равной 100 %. Эти показатели имеют физический смысл и используются только для восстанавливаемых устройств.

*Комплексные показатели надёжности.* В практике для РЭУ широкого применения используют комплексные показатели надёжности, с помощью которых получают обобщенное представление о таких двух свойствах и составляющих надёжности устройств, как безотказность и ремонтпригодность. Эти показатели называют *эксплуатационными коэффициентами надёжности*.

Широко используют следующие коэффициенты:

- коэффициент готовности,  $K_r$ ;
- коэффициент оперативной готовности в течение времени  $t_3$ ,  $K_{o.r}(t_3)$ ;
- коэффициент технического использования,  $K_{и}$ ;
- коэффициент простоя (по вине отказов),  $K_{п}$ .

Под коэффициентом готовности  $K_{\Gamma}$  понимают вероятность того, что РЭУ окажется в работоспособном состоянии в любой произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение РЭУ по назначению не предусматривается.

Количественно коэффициент готовности можно подсчитать по формуле

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\left( \sum_{i=1}^m t_i + \sum_{i=1}^m \tau_i \right)}, \quad (7.20)$$

где  $t_i$  – время безотказной работы между  $(i-1)$ - и  $i$ -м отказом;

$\tau_i$  – время восстановления РЭУ после  $i$ -го отказа;

$m$  – количество отказов за рассматриваемый период.

*Коэффициент оперативной готовности.* Под ним понимают вероятность того, что в произвольный момент времени РЭУ окажется в работоспособном состоянии и начиная с этого момента времени будет работать безотказно в течение времени  $t_3$ .

Для коэффициента  $K_{o.r}(t_3)$  справедливо выражение

$$K_{o.r}(t_3) = K_{\Gamma} P(t_3), \quad (7.21)$$

где  $P(t_3)$  – вероятность безотказной работы изделия за время  $t_3$ .

В литературе прошлых лет коэффициент  $K_{o.r}(t_3)$  назывался вероятностью нормального функционирования за время  $t_3$  и обозначался  $P_{н.ф}(t_3)$ .

*Коэффициент технического использования.* Коэффициент  $K_{и}$  характеризует долю времени нахождения РЭУ в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации. Количественно коэффициент  $K_{и}$  может быть подсчитан по формуле

$$K_{и} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\left( \sum_{i=1}^m t_i + \sum_{i=1}^m t_{\Pi i} \right)}, \quad (7.22)$$

где  $t_{\Pi i}$  – время вынужденного простоя после возникновения  $i$ -го отказа.

Время  $t_{\Pi i}$  в общем случае включает время на обнаружение и устранение отказа, регулировку и настройку РЭУ, время простоя из-за отсутствия запасных элементов, время на проведение профилактических работ и др.

*Коэффициент простоя (по вине отказов).* Коэффициент  $K_{\Pi}$  характеризует расход времени на различные непроизводительные затраты и определяется как отношение суммарного времени вынужденных простоев к общему времени безотказной работы и вынужденных простоев за этот же период эксплуатации:

$$K_{\Pi} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{\Pi i}}{\left( \sum_{i=1}^m t_i + \sum_{i=1}^m t_{\Pi i} \right)}. \quad (7.23)$$

В общем случае в суммарное время простоя входят все непроизводительные затраты времени, исключая время хранения и нахождения в резерве.

Можно показать, что справедливо выражение

$$K_{и} = 1 - K_{п}. \quad (7.24)$$

### 7.3. Надёжность элементов

*Интенсивность отказов как основная характеристика безотказности элементов.* При расчёте показателей надёжности устройств надо располагать справочными данными о показателях надёжности элементов.

В настоящее время основной справочной характеристикой безотказности элементов, приводимой в технических условиях или других технических документах, является интенсивность отказов –  $\lambda_0$ . Она принимается постоянной в течение определённой наработки, также указываемой в технической документации, и соответствует номинальному электрическому режиму и нормальным (лабораторным) условиям эксплуатации, если явно не указано иное. Выбор этой характеристики в качестве основной объясняется следующим.

Экспериментально было установлено, что время до отказа элементов хорошо описывается экспоненциальным законом распределения (7.1):

$$w(t) = \lambda e^{-\lambda t},$$

где  $\lambda$  – параметр экспоненциального распределения.

В случае экспоненциального распределения вероятность безотказной работы за время  $t$  определяется выражением (7.9) – экспоненциальный закон надёжности:

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

Ранее отмечалось, что величины  $w(t)$ ,  $P(t)$  и  $\lambda(t)$  связаны соотношением

$$\lambda(t) = \frac{w(t)}{P(t)}.$$

Тогда получим

$$\lambda(t) = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda = \text{const}. \quad (7.25)$$

Из выражения (7.25) видно, что при экспоненциальном распределении времени до отказа интенсивность отказов постоянна и численно равна параметру  $\lambda$  экспоненциального распределения. Поэтому параметр экспоненциального распределения и интенсивность отказов элементов обозначены одной и той же буквой –  $\lambda$ .

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

Интенсивность отказов современных элементов занимает диапазон примерно  $10^{-10} \dots 10^{-5}$  1/ч.

За рубежом в качестве размерности величины  $\lambda$  используют также процент на 1000 ч работы, что равносильно введению для  $\lambda$  множителя  $10^5$ . В последнее время для высоконадёжных элементов радиоэлектроники в качестве размерности  $\lambda$  стали использовать фит: 1фит =  $10^{-9}$  1/ч.

*Коэффициент электрической нагрузки элементов.* Реальный уровень безотказности элементов зависит от коэффициентов электрической нагрузки, характеризующих степень электрической нагруженности элементов относительно их номинальных или предельных возможностей, указываемых в ТУ.

Количественно коэффициент электрической нагрузки (часто говорят, коэффициент нагрузки) определяют по соотношению

$$K_n = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{ном}}}, \quad (7.26)$$

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

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

В качестве  $F$  выбирают такую электрическую характеристику элемента, которая в наибольшей степени влияет на его надёжность. Характеристики, используемые в качестве  $F$  для типовых элементов РЭС, указаны в табл. 7.4.

Таблица 7.4

Выбор электрической характеристики, используемой для определения  $K_n$

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

Недопустимо использовать элементы с коэффициентом электрической нагрузки  $K_n > 1$  даже по одному из параметров электрического режима. Счита-

ют, что для типовых элементов РЭС оптимальное значение коэффициента нагрузки  $K_{H.опт} \approx 0,2 \dots 0,6$ .

Рассмотрим электрическую нагрузку ИМС. ИМС включает определённое количество элементов, коэффициенты электрической нагрузки которых определяются внутренней структурой (электрической схемой) и конструктивно-технологическими особенностями изготовления ИМС. Значения коэффициентов нагрузки элементов учтены в приводимых справочных данных об интенсивностях отказов ИМС. Причём эти данные соответствуют условиям типовой (усреднённой) электрической нагрузки ИМС и температуре окружающей среды  $t = +25 \text{ }^\circ\text{C}$ . В ряде случаев некоторых групп ИМС допускают работу в облегчённых режимах, например, использование аналоговых ИМС при пониженном напряжении питания, что повышает их эксплуатационную надёжность. Эксплуатационная интенсивность отказов ИМС, используемых в облегчённых режимах, может быть определена с помощью коэффициента  $K_{обл}$ , представляющего отношение рабочей электрической нагрузки к максимально допустимой. Коэффициент  $K_{обл}$  может рассматриваться как некий аналог коэффициента нагрузки  $K_H$  ИМС в целом.

*Характеристика надёжности типовых элементов.* При прочих равных условиях менее надёжными являются элементы, имеющие механические контакты (элементы коммутации, переменные и подстроечные резисторы и т.п.), приборы квантовой электроники, а также мощные полупроводниковые приборы и приборы СВЧ-диапазона. Надёжность ИМС слабо зависит от степени интеграции, т.е. от числа элементов в ИМС. Объясняется это тем, что значительный вклад в ненадёжность ИМС вносят корпус и межсоединения. При прочих равных условиях гибридные ИМС менее надёжны по сравнению с полупроводниковыми из-за наличия в них паяных соединений и навесных компонентов. Цифровые ИМС надёжнее аналоговых. Объясняется это режимом переключения, в котором работают цифровые ИМС.

*Учёт влияния на надёжность элементов электрического режима и условий работы.* На практике с целью повышения надёжности РЭУ коэффициенты нагрузки элементов  $K_H$  выбирают меньше единицы. Условия работы элементов, как правило, оказываются более жесткими, нежели нормальные. Возникает задача пересчёта справочных значений интенсивностей отказов  $\lambda_0$  на конкретный электрический режим (значения  $K_H$ ) и условия работы.

Интенсивность отказов с учётом эксплуатационных факторов обозначим как  $\lambda_э$ , и будем называть эксплуатационной интенсивностью отказов. В настоящее время в инженерной практике для её определения широко используют математическую модель (выражение) вида

$$\lambda_э = \lambda_0 \prod_{i=1}^m K_i, \quad (7.27)$$

где  $K_i$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние фактора  $x_i$ ;

$m$  – количество принятых во внимание факторов из числа, влияющих на безотказность элементов.

В качестве факторов  $x_i$  могут рассматриваться коэффициент нагрузки  $K_n$ , температура, степень жёсткости условий эксплуатации, характер электрического режима, функциональное назначение элемента в схеме, номинальное значение параметра элемента и др. Для РЭА, работающей в обычных, неспецифических условиях, в ряде случаев принимают во внимание три важнейших фактора, влияющих на значение  $\lambda_{\Sigma}$  элемента: коэффициент нагрузки  $K_n$ , температуру и степень жёсткости условий эксплуатации. По результатам экспериментальных исследований получены математические модели и составлены справочные таблицы для определения поправочного коэффициента, учитывающего совместное влияние температуры и  $K_n$ . Его называют коэффициентом режима  $K_p$ . Значение коэффициента эксплуатации  $K_{\Sigma}$ , учитывающего степень жёсткости условий эксплуатации (кроме температуры), показывает, во сколько раз интенсивность отказов элементов в составе РЭУ конкретного класса выше, чем в аппаратуре, работающей в стационарных лабораторных условиях (табл. 7.5).

Таблица 7.5

Значения коэффициента эксплуатации  $K_{\Sigma}$  для элементов РЭА

Класс (группа) элементов	Стационарная в лабораторных условиях	Стационарная в условиях цехов промышленных предприятий	Переносная	Подвижная (возимая)	Применяемая на судах
Интегральные микросхемы	1	2	1,7	1,5	2
Полупроводниковые приборы (ППП)	1	2	1,5	2,5	2
Конденсаторы, резисторы	1	2	2	2,5	2
Переключатели, предохранители	1	2	2	2,5	2
Индикаторы знаковосинтезирующие, кинескопы, ЭЛТ	1	2	1,5	2,5	2
Соединители, кабели, шнуры, монтажные провода	1	2	1,5	2,5	2
Трансформаторы, дроссели	1	1,5	1,5	2	1,5
Оптоэлектронные ППП	1	2	1,5	2,5	2
Прочие элементы	1	2	2,0	2,5	2

#### 7.4. Расчёт показателей надёжности проектируемых РЭУ

При проектировании РЭУ всегда рассчитывают показатели безотказности и показатели ремонтпригодности (если по техническому заданию РЭУ относится к восстанавливаемым изделиям). *Основное расчётное соотношение для*

вероятности безотказной работы устройства получают в предположении, что элементы электрической схемы РЭУ с точки зрения надёжности соединены последовательно. Эта модель надёжности РЭУ иллюстрируется рис. 7.10 и означает, что отказ РЭУ в целом происходит при отказе хотя бы одного из элементов.

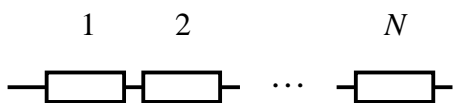


Рис. 7.10. Схема (модель) соединения элементов в РЭУ с точки зрения надёжности:  $N$  – количество элементов в РЭУ

С учётом принятой модели надёжности РЭУ вероятность безотказной работы устройства  $P_{\Sigma}(t_3)$  за заданное время  $t_3$  находят, используя выражение

$$P_{\Sigma}(t_3) = p_1(t_3) \cdot p_2(t_3) \dots p_N(t_3) = \prod_{i=1}^N p_i(t_3), \quad (7.28)$$

где  $N$  – количество элементов в устройстве;

$p_i(t_3)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента, подсчитанная для времени  $t_3$ ,  $i = 1, \dots, N$ .

Выражение соответствует предположению, что отказы элементов являются случайными и независимыми друг от друга.

В случае экспоненциального закона надёжности элементов

$$P_{\Sigma}(t_3) = e^{-\lambda_1 t_3} \cdot e^{-\lambda_2 t_3} \dots e^{-\lambda_N t_3} = e^{-t_3 \sum_{i=1}^N \lambda_i}, \quad (7.29)$$

где  $\lambda_i$  – параметр экспоненциального распределения для  $i$ -го элемента, численно равный интенсивности его отказов.

Из выражения (7.29) видно, что расчёт показателя безотказности  $P_{\Sigma}(t_3)$  сводится к определению величины

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \lambda_i, \quad (7.30)$$

называемой суммарной интенсивностью отказов устройства.

Для среднего времени восстановления РЭУ  $T_B$  может быть получено выражение [11]

$$T_B \approx \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \tau_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}, \quad (7.31)$$

где  $\tau_i$  – среднее время восстановления  $i$ -го элемента (значения этих величин можно найти в справочниках для различных видов элементов и классов аппаратуры).



Существующие методы расчёта показателей безотказности и ремонтпригодности РЭУ различаются степенью точности учёта электрического режима и условий работы элементов в составе устройства. Расчёты подразделяют на предварительные (приближённые или ориентировочные) и окончательные. Приближённые выполняют на ранних стадиях проектирования, обычно на стадии эскизного проекта (ЭП), окончательные – на стадии технического проекта (ТП).

На практике используют различные разновидности приближённого расчёта. Простейшая из них описана в [11]. В этом случае учёт электрического режима, температуры, других параметров окружающей среды и факторов, влияющих на безотказность элементов, выполняется приближенно с помощью обобщенного эксплуатационного коэффициента  $K_{Э.ОБ}$ . Значение этого коэффициента зависит от вида РЭУ и условий его эксплуатации (табл. 7.6).

Таблица 7.6

Значения обобщенного эксплуатационного коэффициента  $K_{Э.ОБ}$  [11]

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

*Примечание.* В скобках в табл. 7.6 указаны значения, рекомендуемые для использования в расчётах в случае недостаточности данных об условиях эксплуатации.

Суммарную интенсивность отказов РЭУ с учётом электрического режима и условий эксплуатации определяют как

$$\Lambda_{РЭУ} = K_{Э.ОБ} \cdot \sum_{j=1}^k \lambda_{0j} n_j, \quad (7.32)$$

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

$k$  – число сформированных групп однотипных элементов;

$n_j$  – количество элементов в  $j$ -й группе,  $j = 1, \dots, k$ ;

$K_{Э.ОБ}$  – обобщенный эксплуатационный коэффициент, выбираемый по таблицам в зависимости от вида РЭУ и (или) условий его эксплуатации.

Другие показатели безотказности подсчитывают по общепринятым формулам для экспоненциального распределения времени до отказа РЭУ [11].

Наработка на отказ:

$$T_0 = \frac{1}{\Lambda_{\text{РЭУ}}}. \quad (7.33)$$

Вероятность безотказной работы за заданное время  $t_3$ :

$$P_{\text{РЭУ}}(t_3) = e^{-t_3 \cdot \Lambda_{\text{РЭУ}}} = e^{-t_3/T_0}. \quad (7.34)$$

Среднее время безотказной работы устройства (средняя наработка до отказа):

$$T_{\text{ср}} = T_0. \quad (7.35)$$

Гамма-процентная наработка до отказа  $T_\gamma$  определяется как

$$T_\gamma = -\frac{\ln(\gamma/100)}{\Lambda_{\text{РЭУ}}} = -T_0 \ln(\gamma/100). \quad (7.36)$$

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

В промышленности широко используют разновидность *приближённого расчёта* показателей безотказности и ремонтпригодности, в которой используют значения эксплуатационных интенсивностей элементов  $\lambda_{\text{Э}}$  при коэффициенте нагрузке  $K_{\text{н}} = 0,7$  для активных и  $K_{\text{н}} = 0,4$  – для пассивных элементов, а рабочую температуру принимают равной  $35^\circ\text{C}$ . При выполнении *уточнённого расчёта* значения интенсивностей отказов элементов определяют для фактических значений параметров электрической нагрузки и условий эксплуатации.

Для указанной разновидности приближённого расчёта, а также для уточнённого расчёта показателей безотказности на стадии ТП суммарную интенсивность отказов РЭУ  $\Lambda_{\text{РЭУ}}$  определяют по формуле

$$\Lambda_{\text{РЭУ}} \approx K_{\text{ам}} K_{\text{обсл}} \sum_{i=1}^N \lambda_{\text{Э}i}, \quad (7.37)$$

где  $K_{\text{ам}}$  – коэффициент, учитывающий наличие амортизации РЭУ;

$K_{\text{обсл}}$  – коэффициент качества обслуживания РЭУ;

$\lambda_{\text{Э}i}$  – эксплуатационная интенсивность отказов  $i$ -го элемента;

$N$  – количество элементов (компонентов) в РЭУ.

Значения коэффициента  $K_{\text{ам}}$ : 0,85 – при наличии амортизации; 1 – без амортизации. Значения коэффициента  $K_{\text{обсл}}$  выбирают в зависимости от того, будет ли выполняться профилактическое техническое обслуживание. Для бытовых РЭУ  $K_{\text{обсл}} = 1$ . Для РЭУ производственно-технического назначения  $K_{\text{обсл}} = 0,5$  (если документацией предусмотрено техническое обслуживание).

В табл.7.7 приводятся математические модели, используемые для определения значений  $\lambda_{\text{Э}}$  типовых элементов РЭА. Пояснение величин, входящих в модели, даётся в табл. 7.8.

Математические модели определения значений  $\lambda_{\text{Э}}$ 

Класс (группа) элементов	Вид математической модели	Номера формул и таблиц для определения коэффициентов
Интегральные микросхемы (типовой электрический режим работы)	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_t K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_{\text{Э}}$	(7.38), (7.39), табл. 7.10–7.12
Интегральные микросхемы, работающие в облегчённых электрических режимах	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_P K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_{\text{Э}}$	(7.38), (7.40), табл. 7.10–7.12
Диоды, кроме стабилитронов. Диодные сборки	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_P K_{\Phi} K_D K_U K_{\text{Э}}$	(7.42), табл. 7.13–7.16
Стабилитроны	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_P K_{\text{Э}}$	(7.42), табл. 7.13
Транзисторы биполярные, транзисторные сборки	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_P K_{\Phi} K_D K_U K_{\text{Э}}$	(7.42), табл. 7.13–7.16
Транзисторы полевые	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_P K_{\Phi} K_{\text{Э}}$	(7.42), табл. 7.13, 7.14
Тиристоры	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_P K_D K_{\text{Э}}$	(7.42), табл. 7.13, 7.15
Оптоэлектронные элементы (светодиоды, оптопары и др.)	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_P K_{\text{Э}}$	(7.43)–(7.45)
Конденсаторы неполярные, электролитические	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_P K_C K_{\text{Э}}$	(7.46), табл. 7.17, 7.18
Резисторы постоянные: металлодиэлектрические углеродистые	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_P K_R K_M K_{\text{Э}}$ $\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_P K_R K_{\text{Э}}$	(7.47), табл. 7.19–7.22
Терморезисторы	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_{\text{Э}}$	–
Переменные проволочные	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_P K_R K_{\text{Э}}$	(7.47), табл. 7.19, 7.20
Переменные непроволочные	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_P K_R K_U K_{\text{Э}}$	(7.47), табл. 7.19–7.22
Элементы коммутации (переключатели, тумблеры, кнопки и т.п.)	$\lambda_{\text{Э}} = (\lambda_{0\Gamma}^{(к.н)} K_K K_F + \lambda_{0\Gamma}^{(вкл)} NF) K_P K_{\text{Э}}$	(7.48)–(7.49), табл. 7.23
Соединители (разъёмы)	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_P K_K K_n K_{\text{Э}}$	(7.50)–(7.52)
<b>Индикаторы</b>		
Полупроводниковые	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_P K_{\text{Э}}$	(7.43)
Вакуумные люминесцентные	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_t K_{\text{Э}}$	(7.53)
другие, ЭЛТ, кинескопы и т.п.	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_{\text{Э}}$	–
<b>Прочие элементы и компоненты</b>		
Трансформаторы	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_P K_{\text{Э}}$	(7.54)–(7.57), табл. 7.24
Дроссели, катушки индуктивности	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_P K_{\text{Э}}$	(7.58)
Реле электромагнитные общего назначения	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma}^{(L)} K_P^{(L)} K_F K_{\text{Э}}^{(L)} + \lambda_{0\Gamma}^{(ком)} F K_P K_K K_{\text{Э}}$	(7.59)–(7.61), табл. 7.25
Резонаторы пьезоэлектрические	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_t K_{\text{Э}}$	(7.62)
Предохранители	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0\Gamma} K_t K_{\text{Э}}$	(7.63)

Класс (группа) элементов	Вид математической модели	Номера формул и таблиц для определения коэффициентов
Платы со сквозными металлизированными отверстиями	$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{б}} K_{\text{э}} [N_1 K_{\text{сл}} + N_2 (K_{\text{сл}} + 13)]$	–
Соединения, в том числе пайкой <sup>2</sup>	$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{б}} K_{\text{э}}$	–
Электрические лампочки	$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{ог}} K_{\text{э}}$ , принимается $K_{\text{э}} = 1$	–
Кабели, шнуры, монтажные провода	$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{б}} K_T K_{\text{э}} L$	(7.64)–(7.67), табл. 7.26

Примечания: 1. Коэффициент  $K_{\text{э}}$  выбирается по табл. 7.5.

2. Модель распространяется на любые соединения (пайки), используемые во всех платах (узлах), кроме соединений (паек) в платах с металлизированными отверстиями. Все виды паяк сквозных металлизированных отверстий следует учитывать в модели расчёта эксплуатационной интенсивности отказов плат с металлизированными отверстиями.

Таблица 7.8

Пояснения величин (параметров), входящих в математические модели

Параметр	Пояснение
<b>Составляющие, входящие в модели для всех видов элементов</b>	
$\lambda_{\text{ог}}$	Интенсивность отказов группы элементов ( $\lambda_{\text{ог}}$ ) данного вида, отвечающая температуре окружающей среды +25 °С и номинальной электрической нагрузке, т.е. значению коэффициента электрической нагрузки $K_{\text{н}} = 1$
$K_{\text{р}}$	Коэффициент режима работы, зависящий от электрической нагрузки (коэффициента $K_{\text{н}}$ ) и температуры корпуса элемента
$K_{\text{т}}$	Коэффициент, зависящий от температуры корпуса элемента (компонента)
$K_{\text{э}}$	Коэффициент, зависящий от жёсткости условий эксплуатации (РЭУ)
<b>Составляющие, входящие в модели для интегральных микросхем (ИМС)</b>	
$K_{\text{ИС}}$	Коэффициент, учитывающий количество элементов в ИМС или бит (для ИМС памяти)
$K_{\text{корп}}$	Коэффициент, учитывающий тип корпуса
$K_{\text{V}}$	Коэффициент, учитывающий напряжение питания для КМОП ИМС
<b>Составляющие, входящие в модели для полупроводниковых приборов</b>	
$K_{\text{ф}}$	Коэффициент, учитывающий функциональный режим работы прибора
$K_{\text{д}}$	Коэффициент, зависящий от значения максимально допустимой по ТУ нагрузки по мощности (или току)
$K_{\text{U}}$	Коэффициент, зависящий от отношения рабочего напряжения к максимально допустимому по ТУ (коэффициента нагрузки по напряжению)
<b>Составляющие, входящие в модели для конденсаторов</b>	
$K_{\text{С}}$	Коэффициент, зависящий от значения номинальной ёмкости
<b>Составляющие, входящие в модели для резисторов</b>	
$K_{\text{R}}$	Коэффициент, зависящий от значения номинального сопротивления
$K_{\text{M}}$	Коэффициент, зависящий от значения номинальной мощности (для металлодиэлектрических резисторов)
$K_{\text{U}}$	Коэффициент, зависящий от отношения значения рабочего напряжения $U_{\text{раб}}$ на резисторе к максимально допустимому напряжению по ТУ ( $U_{\text{ТУ}}$ ); $U_{\text{раб}} = \sqrt{P_{\text{раб}} R}$ , где $P_{\text{раб}}$ – рабочая мощность, Вт; $R$ – сопротивление, Ом

Параметр	Пояснение
<b>Составляющие, входящие в модели для коммутационных изделий соединителей (разъёмов), реле</b>	
$K_K$	Коэффициент, зависящий от количества задействованных контактов
$K_n$	Коэффициент, зависящий от количества сочленений-расчленений $n$ (соединители)
$t_{\Pi}$	Температура перегрева контактов по ТУ при максимальной токовой нагрузке. Используется для выбора коэффициента $K_K$
$K_F$	Коэффициент, учитывающий число коммутаций в час
$\lambda_{\text{ог}}^{(к.и)}$	Интенсивность отказов коммуникационного изделия в целом, 1/ч
$\lambda_{\text{ог}}^{(вкл)}$	Дополнительная интенсивность отказов, приходящаяся на одно включение при работе коммуникационного изделия в составе РЭА, 1/вкл.
$L$	Верхний индекс, означающий, что соответствующие величины относятся к электромагнитной катушке реле
$\lambda_{\text{ог}}^{(ком)}$	Интенсивность отказов реле, приходящаяся на одну коммутацию
$F$	Средняя частота включений (переключений) или коммутации изделия в час в РЭА
$N$	Количество активных контактов (контактирующих точек)
<b>Составляющие, входящие в модели для печатных плат с металлизированными сквозными отверстиями</b>	
$\lambda_6$	Базовая интенсивность отказов межсоединений в зависимости от технологии
$K_{\text{сл}}$	Коэффициент, учитывающий количество слоёв в плате
$N_1$	Количество сквозных отверстий, пропаянных способом «пайка волной»
$N_2$	Количество сквозных отверстий, пропаянных ручным способом
<b>Составляющие, входящие в модели для шнуров, кабелей, монтажных проводов</b>	
$L$	Длина кабельного изделия в РЭУ, м
$K_T$	Коэффициент, зависящий от рабочей температуры, материала, конструкции изоляции и оболочки
$\lambda_6$	Базовая интенсивность отказов кабельных изделий при температуре +25 °С, 1/ч · м (табл. 7.9)
<b>Составляющие, входящие в модели для соединений</b>	
$\lambda_6$	Базовая интенсивность отказов соединения (табл. 7.9)

В табл. 7.9 приводятся справочные интенсивности отказов ( $\lambda_{\text{ог}}$ ) групп элементов (компонентов) РЭА, соответствующие приёмке «1» (приёмке ОТК), предусматривающей неполный комплекс отбраковочных испытаний без применения тренировки. Значения  $\lambda_{\text{ог}}$  получены умножением усреднённой интенсивности отказов, полученной с использованием справочника [16] для приёмки «5» – общее военное применение (ОВП), на коэффициент приёмки  $K_{\Pi}$ , характеризующий сте-

пень жёсткости требований к контролю качества изготовления и правила приёмки элементов (в [16] приёмке «5» соответствуют значения  $K_{\Pi} = 1$ ). В зависимости от класса и группы элементов принято  $K_{\Pi} = 2 \dots 5,5$  [15–17]. Для полупроводниковых изделий в пластмассовых (полимерных) корпусах в соответствии со справочником [17] использовано значение  $K_{\Pi} = 8$ .

Таблица 7.9

Справочные интенсивности отказов групп элементов и компонентов РЭА

Группа элементов	$\lambda_{ог}, \times 10^{-6} 1/ч$
<b>1. Интегральные микросхемы (ИМС) <sup>1)</sup></b>	
Полупроводниковые цифровые: логические, арифметические, микропроцессоры и микропроцессорные комплекты, регистры сдвига и др.	0,127
оперативные запоминающие устройства (ОЗУ)	0,165
постоянные запоминающие устройства (ПЗУ, ППЗУ, РПЗУ)	0,099
Полупроводниковые аналоговые	0,154
Гибридные ИМС	0,237
<b>2. Полупроводниковые приборы</b>	
Диоды выпрямительные <sup>2)</sup>	0,728
Столбы (мосты) выпрямительные <sup>2)</sup>	1,68
Диоды импульсные <sup>2)</sup>	0,2
Варикапы подстроечные <sup>2)</sup>	0,176
Стабилитроны <sup>2)</sup>	0,0328
Транзисторы биполярные кремниевые, кроме СВЧ <sup>2)</sup>	0,352
Транзисторы полевые: кремниевые <sup>2)</sup>	0,52
арсенидогаллиевые	2,89
Диоды СВЧ	10,62
Транзисторы СВЧ малой и средней мощности	0,32
Транзисторы СВЧ большой мощности	0,9
Тиристоры кремниевые <sup>2)</sup>	1,1
<b>3. Оптоэлектронные полупроводниковые приборы</b>	
Фотодиоды на основе кремния <sup>2)</sup>	1,48
Фототранзисторы <sup>2)</sup>	1,2
Фоторезисторы на основе <i>PbS</i>	5,4
Диоды излучающие инфракрасного и видимого диапазона (светодиоды) <sup>2)</sup>	0,272
Оптопары диодные, транзисторные <sup>2)</sup>	0,408
Оптопары тиристорные, резисторные, микросхемы оптоэлектронные <sup>2)</sup>	1,52
<b>4. Знакосинтезирующие индикаторы</b>	
Индикаторы полупроводниковые <sup>2)</sup> : сегментные буквенно-цифровые дисплеи <sup>3)</sup>	3,28
дисплеи с диодной матрицей <sup>3)</sup>	1,64
Индикаторы вакуумные люминесцентные: цифровые	1,66
буквенно-цифровые	1,38
Индикаторы вакуумные накаливаемые цифровые	0,62
Индикаторы газоразрядные: цифровые	2,37
буквенно-цифровые	4,5
Индикаторы жидкокристаллические цифровые многоразрядные	4,84

Группа элементов	$\lambda_{0г}, \times 10^{-6} 1/ч$
<b>5. Конденсаторы</b>	
слюдяные	0,12
керамические	0,065
бумажные и металлобумажные	0,056
с органическим синтетическим диэлектриком	0,084
электролитические алюминиевые	0,52
<b>6. Резисторы</b>	
Резисторы постоянные непроволочные:	
металлодиэлектрические, металлизированные	0,132
композиционные	0,102
Резисторы переменные:	
непроволочные	0,175
проволочные	0,163
Терморезисторы	0,021
<b>7. Элементы коммутации</b> <sup>4</sup>	
Переключатели галетные	0,174 / 0,0081 (1/вкл.)
Тумблеры	0,3 / 0,0192 (1/вкл.)
Кнопки, кнопочные переключатели	0,48 / 0,027 (1/вкл.)
Микропереключатели	0,135/0,0057 (1/вкл.)
<b>8. Соединители (разъёмы):</b>	
низкочастотные прямоугольные для печатного монтажа	0,01025
низкочастотные для объёмного монтажа	0,026
радиочастотные с полиэтиленовой изоляцией	0,0375
<b>9. Прочие элементы и компоненты</b>	
Трансформаторы:	
питания	0,071
согласующие, импульсные и др.	0,0114
Электронно-лучевые трубки:	
осциллографические, индикаторные	3,33
кинескопы монохромные	2,2
кинескопы цветные	26,34
Дроссели	0,033
Катушки индуктивности	0,01
Реле электромагнитные общего назначения <sup>5</sup>	0,0912 (1/ком.)
Пьезоэлектрические приборы (кварцевые резонаторы, датчики, фильтры)	0,078
Линии задержки	0,08
Предохранители	0,033
Держатели предохранителей	0,009
Индикаторные электрические лампочки при минимальной продолжительности горения $T_{\min}$ , указываемой в ТУ:	
при постоянном напряжении до 12 В	12,05
при переменном напряжении 200...240 В	155,6
Соединения (значения базовой интенсивности отказов):	
ручная пайка без накрутки	0,0065
ручная пайка с накруткой	0,00035
пайка волной	0,00034
обжимка (опрессовка)	0,0006

Группа элементов	$\lambda_{ог}, \times 10^{-6} \text{ 1/ч}$
Пайки сквозных металлизированных отверстий в платах с металлизированными отверстиями (значения базовой интенсивности отказов в зависимости от технологии межсоединений): печатный монтаж монтаж дискретными проводниками	0,000085 0,00055
Кабели, шнуры, провода монтажные (значения базовой интенсивности отказов) <sup>6</sup> : кабели (провода) радиочастотные коаксиальные провода монтажные низковольтные обычной теплостойкости шнуры питания гибкие с резиновой изоляцией (без вилок питания)	0,0025 (1/м) 0,115 (1/м) 0,074 (1/м)

*Примечания:* 1. Базовые интенсивности отказов, соответствующие ИМС средней степени интеграции не в пластмассовых корпусах условиям типовой (усреднённой) электрической нагрузки и температуре окружающей среды  $t = +25^\circ\text{C}$ .

2. Интенсивность отказов для полупроводниковых изделий в пластмассовых (полимерных) корпусах. Для изделий не в пластмассовых корпусах значение  $\lambda_{ог}$  следует уменьшать в 1,5 раза.

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

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

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

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

Ниже приводятся формулы (математические модели) и таблицы, взятые из работы [15], которые могут быть использованы для определения коэффициентов, входящих в модели расчёта величин  $\lambda_{э}$  (см. табл. 7.7).

*Интегральные микросхемы.* Для определения коэффициента  $K_{ис}$ , учитывающего количество элементов в ИМС или бит (для ИМС памяти), можно воспользоваться математической моделью, полученной по табличным данным работы [15]:

$$K_{ис} = AN^S, \quad (7.38)$$

где  $A, S$  – постоянные коэффициенты модели (табл. 7.10);

$N$  – количество элементов в ИМС или бит.

Таблица 7.10

Коэффициенты моделей (7.38) и (7.39) для различных групп ИМС

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



Значения коэффициента  $K_t$  могут быть получены из выражения

$$K_t = \exp [B(t_{\text{окр}} - 25)], \quad (7.39)$$

где  $B$  – константа, зависящая от функционального назначения ИМС (см. табл. 7.10);  
 $t_{\text{окр}}$  – температура среды, окружающей ИМС, °С.

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

$$K_p = 0,115 \exp(3,1K_{\text{обл}}) \exp [B(t_{\text{окр}} - 25)], \quad (7.40)$$

где  $K_{\text{обл}}$  – отношение рабочей электрической нагрузки к максимально допустимой (электрическая характеристика, принимаемая во внимание, выбирается в зависимости от характера облегчённости электрического режима ИМС).

Значение  $t_{\text{окр}}$  должно определяться из выражения

$$t_{\text{окр}} = t_{\text{раб max}} + \Delta t_3, \quad (7.41)$$

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

$\Delta t_3$  – перегрев в нагретой зоне РЭУ (по результатам расчёта теплового режима конструкции РЭУ).

Значения коэффициента  $K_{\text{корп}}$  в зависимости от типа корпуса ИМС приведены в табл. 7.11. Значения коэффициента  $K_V$  следует выбирать из табл. 7.12.

Таблица 7.11

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

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

Таблица 7.12

Значения коэффициента  $K_V$  в зависимости от максимальных значений напряжения питания

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

*Полупроводниковые приборы.* Значения коэффициента  $K_p$  могут быть рассчитаны с помощью математической модели

$$K_p = A \exp \left[ \frac{N_T}{273 + t_{\text{окр}} + \Delta t K_H} + \left( \frac{273 + t_{\text{окр}} + \Delta t K_H}{T_M} \right)^L \right], \quad (7.42)$$

где  $A$ ,  $N_T$ ,  $T_M$ ,  $L$ ,  $\Delta t$  – константы модели;

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

$K_H$  – коэффициент электрической нагрузки (см. табл. 7.4).

Значения констант, входящих в модель (7.42), приведены в табл. 7.13.

Таблица 7.13

Константы модели (7.42)

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

Значения коэффициента  $K_\Phi$  следует выбирать из табл. 7.14.

Таблица 7.14

Влияние функционального режима работы на коэффициент  $K_\Phi$

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

При выборе коэффициента  $K_d$  следует руководствоваться табл. 7.15.

Значения коэффициента  $K_D$ 

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

Значения коэффициента  $K_U$  приведены в табл. 7.16.

Таблица 7.16

Значения коэффициента  $K_U$ 

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

*Примечание.* 1. Используется коэффициент нагрузки по обратному напряжению.

*Оптоэлектронные элементы (светодиоды, оптопары и др.).* Значения коэффициента  $K_P$  для излучающих диодов, оптопар диодных, транзисторных, тиристорных и резисторных могут быть рассчитаны с помощью математической модели

$$K_P = \left( \frac{I_{пр.ср}}{I_{пр.ср0}} \right)^m \exp \left[ \frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{t_{п0} + 273} - \frac{1}{t_{п} + 273} \right) \right], \quad (7.43)$$

где  $I_{пр.ср}$ ,  $I_{пр.ср0}$  – средний прямой ток излучателя соответственно в рабочем и номинальном режимах;

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

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

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

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

При работе элемента в импульсном режиме  $m = 2$ . Для других режимов в зависимости от типа излучающего материала величина  $m$  равна:

1,4 – для *GaAs*; 1,2 – для *GaP*; 1,5 – для *GaAlAs*, *GaAsP*.

Температура  $p$ - $n$ -перехода определяется по формуле

$$t_{п} = P_{\text{раб}} R_{\text{T}} + t_{\text{окр}}; \quad t_{п0} = P_{\text{max}} R_{\text{T}} + 25 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (7.44)$$

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

$P_{\text{max}}$  – максимальная рассеиваемая мощность при температуре  $+25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , Вт;

$R_{\text{T}}$  – тепловое сопротивление,  $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ;

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

При отсутствии значений  $R_{\text{T}}$  температура  $p$ - $n$ -перехода примерно может быть определена как

$$t_{п} \approx t_{\text{раб max}} + \frac{I_{\text{пр.ср}}}{I_{\text{пр.ср}0}} 20, \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad t_{п0} = t_{\text{ном}} + 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = 25 + 20 = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (7.45)$$

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

Значение коэффициента  $K_{\text{P}}$  для оптоэлектронных микросхем может быть принято равным единице.

**Конденсаторы.** Значения коэффициента  $K_{\text{P}}$  могут быть рассчитаны с помощью математической модели

$$K_{\text{P}} = A \left[ \left( \frac{K_{\text{H}}}{N_{\text{S}}} \right)^{\text{H}} + 1 \right] \exp \left[ B \left( \frac{t_{\text{окр}} + 273}{N_{\text{T}}} \right)^{\text{G}} \right], \quad (7.46)$$

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

$K_{\text{H}}$  – коэффициент электрической нагрузки конденсатора по напряжению;

$A, B, N_{\text{T}}, G, N_{\text{S}}, H$  – постоянные коэффициенты (табл. 7.17).

Таблица 7.17

Постоянные коэффициенты модели (7.46)

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

Значения коэффициента  $K_{\text{C}}$  могут быть подсчитаны по математическим моделям, приведённым в табл. 7.18.

Модели для подсчёта коэффициента  $K_C$ 

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

*Резисторы.* Значения коэффициента  $K_R$  рассчитывают по модели

$$K_R = A \exp \left[ B \left( \frac{t + 273}{N_T} \right)^G \right] \exp \left\{ \left[ \left( \frac{K_H}{N_S} \right) \left( \frac{t + 273}{273} \right)^J \right]^H \right\}, \quad (7.47)$$

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

$K_H$  – коэффициент электрической нагрузки резистора по мощности;

$A, B, N_T, G, N_S, J, H$  – постоянные коэффициенты (табл. 7.19).

Таблица 7.19

Постоянные коэффициенты модели (7.47)

Группа резисторов	$A$	$B$	$N_T$	$G$	$N_S$	$J$	$H$
Резисторы постоянные:							
металлодиэлектрические	0,260	0,5078	343	9,278	0,878	1	0,886
углеродистые	0,191	0,651	343	10,46	0,749	0,8	1,295
Резисторы переменные:							
непроволочные керметные	0,5588	0,445	358	7,3	2,69	2,46	1
проволочные	0,202	1,14	343	21,7	0,529	1	0,599

Значения коэффициентов  $K_R, K_M$  и  $K_U$  выбирают из табл. 7.20–7.22 .

Таблица 7.20

Значения коэффициента  $K_R$ 

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

Таблица 7.21

Значения коэффициента  $K_M$  для металлодиэлектрических резисторов

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

Таблица 7.22

Значения коэффициента  $K_U$  для переменных непроволочных резисторов

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

Элементы коммутации (переключатели, тумблеры, кнопки и т.п.). Значения  $K_P$  рассчитывают по модели

$$K_P = 7 \left( \frac{t + 273}{398} \right)^{12} \exp(1,25 K_H), \quad (7.48)$$

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

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

$K_H$  – коэффициент электрической нагрузки по току.

Значения коэффициента  $K_K$  выбирают из табл. 7.23.

Таблица 7.23

Значения коэффициента  $K_K$  для коммутационных изделий

Группа изделий	Количество задействованных контактов $N$	$K_K$	Группа изделий	Количество задействованных контактов $N$	$K_K$
Тумблеры	Однополюсные	0,5	Переключатели	1	0,25
	Двухполюсные	1,0	кнопочные,	2	1,0
	Трёхполюсные	1,5	движковые	$\geq 3$	2,0
	Четырёхполюсные	2,0	Переключатели галетные	–	1

Значения коэффициента  $K_F$  в зависимости от частоты включений в час могут быть получены как

$$K_F = 0,5 \text{ при } F < 100; K_F = 0,5 + 0,25 \lg F \text{ при } F \geq 100, \quad (7.49)$$

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

Соединители (разъёмы). Значения  $K_P$  определяют по модели

$$K_P = \exp \left[ 9000 \left( \frac{1}{298 + t_n} - \frac{1}{273 + t_{\text{окр}} + t_n \exp[-1,8(1 - K_H)]} \right) \right], \quad (7.50)$$

где  $t_{\text{п}}$  – температура перегрева контактов по ТУ при максимальной токовой нагрузке, по ТУ  $t_{\text{п}} = 10 \dots 30 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;

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

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

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

$$K_{\text{к}} = \exp[0,1(N - 1)]^{0,51064}. \quad (7.51)$$

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

$$K_{\text{n}} = 0,37 \exp(0,002n). \quad (7.52)$$

*Знакосинтезирующие индикаторы.* Значения коэффициента  $K_{\text{р}}$  для полупроводниковых индикаторов определяют по модели (7.43), точно так же, как и для излучающих диодов инфракрасного диапазона.

Значения коэффициента  $K_{\text{т}}$  для вакуумных люминесцентных индикаторов с зелёным люминофором могут быть рассчитаны по формуле

$$K_{\text{т}} = \exp[0,00923(t_{\text{окр}} - 25)], \quad (7.53)$$

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

Для других цветов люминофора  $K_{\text{т}}$  принимается равным единице.

*Трансформаторы.* Значения коэффициента  $K_{\text{р}}$  рассчитывают по модели

$$K_{\text{р}} = A \exp\left(\frac{t_{\text{м}} + 273}{T_{\text{м}}}\right)^G, \quad (7.54)$$

где  $t_{\text{м}}$  – температура максимально нагретой точки обмотки трансформатора, характеризуется классом изоляции;

$A$ ,  $G$ ,  $T_{\text{м}}$  – постоянные модели (табл. 7.24).

Таблица 7.24

Значения постоянных модели (7.54)

Максимально допустимая температура по ТУ $t_{\text{max}}$ , $^\circ\text{C}$ (класс изоляции)	$A$	$G$	$T_{\text{м}}$	Максимально допустимая температура по ТУ $t_{\text{max}}$ , $^\circ\text{C}$ (класс изоляции)	$A$	$G$	$T_{\text{м}}$
70...85 (A)	0,81	15,6	329	95...105 (B)	0,891	14	352

Температуру  $t_{\text{м}}$  определяют как

$$t_{\text{м}} = t_{\text{окр}} + t_{\text{п}}, \quad (7.55)$$

где  $t_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_{\text{п}}$  – температура перегрева,  $^\circ\text{C}$ .

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

$$t_{\text{п}} = 0,25t_{\text{п.ТУ}}(3K_{\text{Н}} + 1), \quad (7.56)$$

а для  $f > 50$  Гц – по выражению

$$t_{\text{п}} = 0,5t_{\text{п.ТУ}}(K_{\text{Н}} + 1), \quad (7.57)$$

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

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

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

*Дроссели, катушки индуктивности.* Значения коэффициента  $K_{\text{Р}}$  примерно могут быть рассчитаны с помощью математической модели

$$K_{\text{Р}} = \frac{1}{1,35 - 1,18K_{\text{Н}}} \exp(t_{\text{окр}} - 50)^{0,0851}, \quad (7.58)$$

где  $K_{\text{Н}}$  – коэффициент нагрузки по току (см. табл. 7.4);

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

*Реле.* Значения коэффициента  $K_{\text{Р}}$  рассчитывают по модели вида

$$K_{\text{Р}} = A \exp\left[\left(\frac{t_{\text{окр}} + 273}{N_{\text{T}}}\right)^G\right] \exp\left[\left(\frac{K_{\text{Н}}}{N_{\text{S}}}\right)^H\right], \quad (7.59)$$

где  $A, N_{\text{T}}, G, N_{\text{S}}, H$  – постоянные коэффициенты (табл. 7.25);

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

$K_{\text{Н}}$  – коэффициент нагрузки реле по коммутируемому току ( $K_{\text{Н}} = I_{\text{раб}} / I_{\text{ТУ}}$ ).

Таблица 7.25

Значения коэффициентов модели (7.59)

Максимально допустимая температура реле по ТУ	Вид нагрузки	Значения коэффициентов				
		$A$	$N_{\text{T}}$	$G$	$N_{\text{S}}$	$H$
До 85 °С включительно	Активная	0,1951	352	15,7	0,8	2
	Индуктивная				0,4	
> 85 °С до 125 °С	Активная	0,1919	377	10,4	0,8	2
	Индуктивная				0,4	

Значения коэффициента  $K_{\text{F}}$  в зависимости от числа коммутаций реле в час  $F$  при работе в составе РЭУ могут быть определены как

$$K_{\text{F}} = 0,1 \text{ при } F \leq 1, K_{\text{F}} = F/10 \text{ при } F > 1. \quad (7.60)$$

Значения коэффициента  $K_{\text{K}}$ , учитывающего влияние на надёжность реле количества задействованных контактов  $N$  (для негерметичных реле):

$$K_{\text{K}} = 0,42 + 0,24N. \quad (7.61)$$



*Пьезоэлектрические приборы.* Усреднённые значения коэффициента  $K_t$  можно рассчитать по модели

$$K_t = \exp[0,017(t_{\text{окр}} - 25)], \quad (7.62)$$

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

*Предохранители.* Значения коэффициента  $K_t$  рассчитывают по модели

$$K_t = 0,061t_{\text{окр}} - 0,525, \quad (7.63)$$

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

*Кабели, шнуры, монтажные провода.* Усреднённое значение коэффициента  $K_t$  определяют по математической модели

$$K_t = \exp \left[ E \left( \frac{1}{298} - \frac{1}{t_p + 273} \right) \right], \quad (7.64)$$

где  $E$  – коэффициент, определяемый материалом изоляции кабельного изделия; может быть принят: 4570 – для монтажных проводов; 9862 – для радиочастотных кабелей, проводов; 11233 – для шнуров питания;

$t_p$  – рабочая температура, °С.

Температура  $t_p$  складывается из двух составляющих:

$$t_p = t_{\text{окр}} + \Delta t_{\text{п}}, \quad (7.65)$$

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

$\Delta t_{\text{п}}$  – перегрев, обусловленный теряемой в кабеле (проводе) электрической или электромагнитной энергией.

Значения  $\Delta t_{\text{п}}$  для шнуров питания и монтажных проводов примерно может быть найдена как

$$\Delta t_{\text{п}} = (t_{\text{max}} - 25) K_{\text{H}}^2, \quad (7.66)$$

где  $K_{\text{H}}$  – коэффициент электрической нагрузки;

$t_{\text{max}}$  – максимальная рабочая температура шнура, провода, °С.

Коэффициент  $K_{\text{H}}$  определяют как отношение

$$K_{\text{H}} = j/j_{\text{max}}, \quad (7.67)$$

где  $j$  – рабочая плотность тока в проводе,

$j_{\text{max}}$  – максимально допустимая по ТУ плотность тока.

Плотность тока  $j_{\text{max}}$  в случае недостаточности данных может быть принята равной 3,5 А/мм<sup>2</sup>.

Должно выполняться условие  $t_p \leq t_{\text{max}}$ . В противном случае величина  $K_{\text{H}}$  должна быть уменьшена.

Значения максимальной рабочей температуры  $t_{\text{max}}$  для кабельных изделий РЭА широкого применения выбирают из табл. 7.26.

Максимальная рабочая температура кабелей, шнуров, монтажных проводов ( $t_{\max}$ )

Группа кабельного изделия	Значение $t_{\max}$ , °С	Суммарное сечение токопроводящих жил, мм <sup>2</sup>
1. Монтажные и соединительные низковольтные провода с поливинилхлоридной (ПВХ) изоляцией	70	0,08; 0,12; 0,20; 0,35; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5
2. Монтажные и соединительные низковольтные провода с изоляцией из хлопчатобумажной пряжи или шёлка и поливинилхлорида	70	0,08; 0,12; 0,14; 0,20; 0,35; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5
3. Монтажные и соединительные низковольтные провода с полиэтиленовой (ПЭ) изоляцией	85	0,08; 0,12; 0,20; 0,35; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,5
4. Монтажные и соединительные низковольтные провода с двухслойной шелковой полиэтиленовой (ПЭ) изоляцией	100	0,08; 0,12; 0,20; 0,35; 0,5; 0,75; ...
5. Шнуры питания с ПВХ изоляцией	70	0,35; 0,5; 0,75
6. Шнуры питания с ПВХ изоляцией в ПВХ оболочке	70	0,5; 0,75; 1,0; 1,5
7. Шнуры питания гибкие с изоляцией и в оболочке из кремнийорганической резины	100	0,75; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0
8. Кабели радиочастотные со сплошной ПЭ изоляцией и в ПЭ или ПВХ оболочке	85	–

### 7.5. Пример расчёта показателей безотказности РЭУ

Рассмотрим *уточнённый расчёт* показателей безотказности функционального модуля, выполненного с использованием печатного монтажа в виде типового элемента замены (ТЭЗ) на двухслойной печатной плате с металлизированными сквозными отверстиями. Общее количество отверстий на печатной плате 853, из них металлизацию имеют 505 отверстий. Электрическое соединение ТЭЗ с РЭУ, в составе которого будет функционировать ТЭЗ, осуществляется посредством соединителя типа СНП34. РЭУ предназначено для эксплуатации в составе подвижной (возимой) аппаратуры категории исполнения УХЛ 2.1 по ГОСТ 15150–69. Заданное время работы, указанное заказчиком, составляет  $t_p = 1000$  ч. Интересующие показатели безотказности –  $T_0$ ,  $P(t_p)$  и  $T_\gamma$  при  $\gamma = 95$  %.

Предполагаем, что в нашем распоряжении имеются карты электрических режимов работы элементов ТЭЗа и результаты теплового расчёта РЭУ, в составе которого будет функционировать ТЭЗ:

- перегрев в нагретой зоне  $\Delta t_3 = 15$  °С;
- средний перегрев воздуха в РЭУ  $\Delta t_B = 10$  °С.

Считаем, что схмотехническое решение ТЭЗ таково, что ИМС работают в типовых электрических режимах.

Информация об элементах (компонентах), входящих в ТЭЗ, соответствует табл. 7.27.

## Элементы и компоненты, входящие в ТЭЗ

Элемент, компонент	Позиционное обозначение	Тип	Функциональное назначение	Количество	Примечание
ИМС <sup>1</sup>	DA1	512ПС11	Преобразователь частоты	1	5652 элемента
ИМС	DD1	533АГ3	Формирователь импульсов	1	238 элементов
ИМС	DD2 – DD11	533ИК4	Комбинированная цифровая ИМС	10	2200 элементов
ИМС	DD12 – DD17	533ИР28	Регистр	6	560 элементов
ИМС	DD18 – DD23	533ИЕ17	Счётчик	6	455 элементов
ИМС	DD24	541РУ5	ОЗУ	1	8192 бит
ИМС	DD25	573РФ2	ПЗУ	1	16384 бит
Диоды импульсные	VD1 – VD12	КД520А	–	12	$I_{пр.ср \max \text{ ТУ}} < 1 \text{ А}$ , $U_{обр} = 60 \text{ В}$ , $K_H^{(U)} < 0,6$
Тиристор	VS1	КУ709Г2	Симистор	1	$I_{пр.ср \max \text{ ТУ}} = 10 \text{ А}$
Биполярные транзисторы (БТ)	VT1 – VT12	КТ3130А	–	12	Мощность до 1 Вт, $K_H^{(U)} < 0,5$
БТ средней мощности	VT13 – VT16	КТ653А	–	4	Мощность до 5 Вт, $K_H^{(U)} < 0,5$
Конденсаторы керамические	C1 – C30	К10–73	–	30	$C = 0,01 \text{ мкФ}$ , $U = 100 \text{ В}$
Резисторы	R1 – R52	C2–34	–	52	$P_{ном} = 0,125 \text{ Вт}$ , $R < 1 \text{ кОм}$
Резисторы	R53 – R54	C2–23	–	2	$P_{ном} = 1 \text{ Вт}$ , $R < 1 \text{ кОм}$
Соединитель (розетка)	XS1	СНП34	–	1	135 конт., $t_{п} = 30 \text{ }^\circ\text{С}$ , $n \approx 200$ за время $t_p$
Кварцевый резонатор	Q1	РК371	–	1	$f = 1048,576 \text{ кГц}$
МО <sup>2</sup> , пропаянные волной	–	–	–	489	–
МО, пропаянные ручным способом	–	–	–	16	Сторона установки элементов
Соединения пайкой волной	–	–	–	348	Дополнительно к МО, пропаянных волной

Примечания: 1. Корпуса используемых ИМС – пластмассовые.

2. МО – металлизированные отверстия.

Этапы расчёта.

**Этап 1.** Пользуясь картами электрических режимов, находим коэффициенты электрической нагрузки элементов. Считаем, что полученные данные соответствуют значениям, указанным в табл. 7.28.

Расчёт эксплуатационной безотказности элементов ТЭЗ

Позиционное обозначение	Количество $n_j$	$K_H$	$\lambda_{0Г} (\lambda_6), \times 10^{-6}$ 1/ч	Вид математической модели расчёта $\lambda_{\text{Э}}$	Значение поправочного коэффициента													$\prod_i K_i$	$n_j \lambda_{\text{Э}j}, \times 10^{-6}$ 1/ч	
					$K_{\text{ИС}}$	$K_P$	$K_t$	$K_{\text{корп}}$	$K_V$	$K_{\Phi}$	$K_D$	$K_U$	$K_C$	$K_R$	$K_M$	$K_K$	$K_n$			$K_{\text{Э}}$
DA1	1	–	0,154	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0Г} K_t K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_{\text{Э}}$	4,25		1,99	3	1									1,5	38,0588	5,86106
DD1	1	–	0,127	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0Г} K_t K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_{\text{Э}}$	1,62		1,88	3	1									1,5	13,7052	1,74056
DD2–DD11	10	–	0,127	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0Г} K_t K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_{\text{Э}}$	3,08		1,88	3	1									1,5	26,0568	33,09214
DD12–DD17	6	–	0,127	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0Г} K_t K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_{\text{Э}}$	2,08		1,88	3	1									1,5	17,5968	13,40876
DD18–DD23	6	–	0,127	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0Г} K_t K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_{\text{Э}}$	1,96		1,88	3	1									1,5	16,5816	12,63518
DD24	1	–	0,165	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0Г} K_t K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_{\text{Э}}$	2,13		1,88	3	1									1,5	18,0198	2,97327
DD25	1	–	0,099	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0Г} K_t K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_{\text{Э}}$	3,33		1,88	3	1									1,5	28,1718	2,78901
VD1–VD12	12	0,4	0,2	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0Г} K_P K_{\Phi} K_D K_U K_{\text{Э}}$		0,193				0,6	0,6	0,7						2,5	0,1216	0,29182
VS1	1	0,3	1,1	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0Г} K_P K_D K_{\text{Э}}$		0,182				6								2,5	2,73	3,003
VT1–VT12	12	0,2	0,352	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0Г} K_P K_{\Phi} K_D K_U K_{\text{Э}}$		0,21				0,7	0,5	0,5						2,5	0,0919	0,38819
VT13–VT16	4	0,6	0,352	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0Г} K_P K_{\Phi} K_D K_U K_{\text{Э}}$		0,47				0,7	0,8	0,5						2,5	0,329	0,46323
C1–C30	30	0,1	0,065	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0Г} K_P K_C K_{\text{Э}}$		0,07							1,21					2,5	0,2118	0,41301
R1–R52	52	0,1	0,132	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0Г} K_P K_R K_M K_{\text{Э}}$		0,43								1	0,7			2,5	0,7525	5,16516
R53–R54	2	0,6	0,132	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0Г} K_P K_R K_M K_{\text{Э}}$		0,84								1	1,5			2,5	3,15	0,8316
XS1	1	0,2	0,01025	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0Г} K_P K_K K_n K_{\text{Э}}$		1,19										43,08	0,55	2,5	70,4897	0,72252
Q1	1	–	0,078	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{0Г} K_t K_{\text{Э}}$			1,53											2,5	3,825	0,29835
Печатная плата	1	–	–	См. табл. 7.7														2,5	2,5	0,15151
Соединения пайкой волновой	348	–	0,00034	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_6 K_{\text{Э}}$														2,5	2,5	0,2958

**Этап 2.** Определяем максимальную температуру элементов ТЭЗ при работе ТЭЗ в составе РЭУ. Для учёта влияния температуры на эксплуатационную интенсивность отказов элементов  $\lambda_{\Sigma}$  принято во внимание верхнее значение предельной рабочей температуры (+40 °С), соответствующее исполнению УХЛ2.1 по ГОСТ 15150–69.

Предельная рабочая температура  $t_{\text{эл max}}$  теплонагруженных элементов (ИМС, транзисторы, диоды, мощные резисторы) определена как

$$t_{\text{эл max}} = t_{\text{раб max}} + \Delta t_3 = 40 + 15 = 55 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где  $t_{\text{раб max}}$  – верхнее значение предельной рабочей температуры (+40 °С);

$\Delta t_3$  – перегрев в нагретой зоне РЭУ.

Нагретая зона – это гипотетический объём, в котором условно рассеивается вся тепловая энергия, выделяемая элементами РЭУ.

Значение величины  $t_{\text{эл max}}$  для нетеплонагруженных элементов (конденсаторы, слаботеплонагруженные резисторы, соединитель, кварцевый резонатор) подсчитано как

$$t_{\text{эл max}} = t_{\text{раб max}} + \Delta t_{\text{в}} = 40 + 10 = 50 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где  $t_{\text{в}}$  – средний перегрев воздуха внутри конструкции РЭУ.

**Этап 3.** Пользуясь табл. 7.9, находим справочные значения интенсивностей отказов элементов ТЭЗ. Полученные данные внесены в табл. 7.28.

**Этап 4.** По табл. 7.7 выбираем математические модели расчёта эксплуатационной интенсивности отказов элементов  $\lambda_{\Sigma}$  ТЭЗа. Выбранные модели записаны в табл. 7.28.

**Этап 5.** Определяем значения поправочных коэффициентов, входящих в выбранные модели расчёта эксплуатационной интенсивности отказов элементов  $\lambda_{\Sigma}$ . Номера формул или таблиц, используемых для определения поправочных коэффициентов, находим по табл. 7.7 в зависимости от класса (группы) элементов ТЭЗ. Например, для расчёта коэффициентов  $K_{\text{ИС}}$  интегральных микросхем использована модель (7.38) и табл. 7.10.

Полученные значения поправочных коэффициентов записаны в табл. 7.28.

**Этап 6.** Для каждого элемента или группы элементов ТЭЗ находим произведение поправочных коэффициентов и значение суммарной эксплуатационной интенсивности отказов  $\lambda_{\Sigma}$ , определяемое как

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

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

$n_j$  – количество элементов в  $j$ -й группе (см. табл. 7.27).

Если в группе один элемент ( $n_j = 1$ ), то для неё  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma}$ .

Результаты расчётов этапа внесены в два последних столбца табл. 7.28.

**Этап 7.** Определяем эксплуатационную интенсивность отказов печатной платы совместно с металлизированными отверстиями, используя модель, приведённую в табл. 7.7. Учитывая, что для одно- и двусторонних печатных плат коэффициент  $K_{сл} = 1$ , получаем

$$\lambda_{\Sigma} = 0,000085 \cdot 10^{-6} \cdot 2,5 [489 \cdot 1 + 16(1 + 13)] \approx 0,15151 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Использованная модель распространяется только на соединения (пайки) в металлизированных отверстиях. Пайки на печатной плате не в металлизированных отверстиях должны учитываться отдельно.

Печатная плата как компонент конструкции ТЭЗ образует отдельную группу, для неё  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma}$ . Значение записываем в последний столбец табл. 7.28.

**Этап 8.** Определяем общую эксплуатационную интенсивность отказов соединений пайкой волной для отверстий, где нет металлизации, и результат заносим в последний столбец табл. 7.28:

$$\begin{aligned} \lambda_{\Sigma} &= 348 \cdot \lambda_{\Sigma} K_{\Sigma} = \left| \lambda_{\Sigma} = 0,00034 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч (см. табл. 7.9)} \right| = \\ &= 348 \cdot 0,00034 \cdot 10^{-6} \cdot 2,5 = 0,2958 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.} \end{aligned}$$

**Этап 9.** Подсчитываем эксплуатационную интенсивность отказов ТЭЗа ( $\Lambda_{ТЭЗ}$ ). Для этого просуммируем значения, приведённые в последнем столбце табл. 7.28:

$$\Lambda_{ТЭЗ} \approx 84,524 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

**Этап 10.** В предположении экспоненциального закона надёжности находим расчётные значения других показателей безотказности:

а) наработка на отказ:

$$T_0 = 1/\Lambda_{ТЭЗ} \approx 11831,0 \text{ ч;}$$

б) вероятность безотказной работы за время  $t_p = 1000$  ч:

$$P_{ТЭЗ}(t_p) = e^{-t_p/T_0} \approx 0,919;$$

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

$$T_{\gamma} = -T_0 \ln(\gamma/100) = -11831,0 \cdot \ln 0,95 \approx 606,9 \text{ ч.}$$

## 8. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

### 8.1. Государственные стандарты

РЭС на всех этапах жизненного цикла (разработка – производство – эксплуатация – утилизация) сопровождается технической документацией. Состав этой документации и её содержание определяют государственные стандарты. В настоящее время имеется большое количество стандартов, которые сгруппированы по направлениям в следующие комплексы:

ЕСКД – единая система конструкторской документации;

ЕСТД – единая система технологической документации;

ЕСПД – единая система программной документации;

ЕСТПП – единая система технологической подготовки производства;

ЕСЗКС – единая система защиты изделий и материалов от коррозии, старения и биоповреждений и др.

Основная задача стандартизации – обеспечить единую нормативно-техническую, информационную, методическую и организационную основу проектирования, производства и эксплуатации изделий. При этом обеспечивается использование единой терминологии, взаимообмен документацией между предприятиями без её переоформления, совершенствование организации проектных работ, возможность автоматизации разработки технической документации с унификацией машинно-ориентированных форм документов, совершенствование способов учёта, хранения и изменения документации и др. [3].

Например, государственные стандарты, входящие в ЕСКД, устанавливают взаимосвязанные единые правила и положения по порядку разработки, оформления и обращения конструкторской документации (КД) на изделия. Этим стандартам присваивают обозначения по классификационному принципу. Номер стандарта составляется из цифры, присвоенной классу стандартов ЕСКД, одной цифры после точки, обозначающей классификационную группу стандартов в соответствии с табл. 8.1, числа, определяющего порядковый номер стандарта в данной группе, и двузначной цифры (после тире), указывающей год регистрации стандарта. Например, обозначение стандарта ЕСКД «ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению» имеет вид: ГОСТ 2.701-84, т.е. ГОСТ – категория нормативно-технического документа (государственный стандарт), 2 – класс (стандарты ЕСКД), 7 – классификационная группа стандартов, 01 – порядковый номер стандарта в группе, 84 – год регистрации стандарта.

Таблица 8.1

Классификационные группы стандартов в ЕСКД

Шифр группы	Содержание стандартов в группе
0	Общие положения
1	Основные положения

Шифр группы	Содержание стандартов в группе
2	Классификация и обозначение изделий в КД
3	Общие правила выполнения чертежей
4	Правила выполнения чертежей изделий машиностроения и приборостроения
5	Правила обращения КД (учёт, хранение, дублирование, внесение изменений)
6	Правила выполнения эксплуатационной и ремонтной документации
7	Правила выполнения схем
8	Правила выполнения документов строительных, судостроительных и горных дел
9	Прочие стандарты

## 8.2. Конструкторские документы

К конструкторским документам относят графические и текстовые документы, которые определяют состав и устройство изделия и содержат необходимые данные для его разработки, изготовления, контроля, приёмки, эксплуатации и ремонта. Документы в зависимости от стадии разработки подразделяются на проектные и рабочие.

К первым относятся техническое предложение, эскизный и технический проекты [7].

На стадии создания рабочей документации выполняются следующие работы:

- разработка конструкторских документов, предназначенных для изготовления и испытания опытного образца;
- изготовление и испытание опытного образца;
- корректировка конструкторских документов по результатам испытаний опытного образца;
- приемочные испытания опытного образца;
- корректировка конструкторской документации по результатам приемочных испытаний опытного образца;
- изготовление и испытание установочной серии;
- корректировка конструкторской документации по результатам изготовления и испытания установочной серии;
- изготовление и испытание головной (контрольной) серии (при необходимости).

Откорректированная в таком порядке документация используется для организации серийного производства изделий. Документам технического предложения присваивается литера «П»; эскизного проекта – «Э»; технического проекта – «Т»; рабочей документации опытного образца – «О»; серийного (массового) производства – «А» или «Б».



### 8.3. Схемная документация

Схемы разрабатываются на такие изделия, изготовление, описание функционирования и эксплуатация которых невозможны без условного изображения состава и взаимодействия их составных частей.

*Схема* – это графический конструкторский документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними. Такие документы входят в комплект конструкторской документации и содержат вместе с другими документами необходимые данные для проектирования, изготовления, сборки, регулировки и эксплуатации изделий.

В зависимости от составных частей изделия и связей между ними схемы подразделяются на виды, обозначаемые буквами:

- Э – электрические;
- Г – гидравлические;
- К – кинематические;
- Л – оптические;
- П – пневматические и др.

При необходимости могут разрабатываться схемы других видов: вакуумные, газовые, энергетические, автоматизации, комбинированные. Основным видом схем в РЭА являются электрические схемы.

В зависимости от основного назначения схемы подразделяют на следующие типы, обозначаемые цифрами:

- 1 – структурная;
- 2 – функциональная;
- 3 – принципиальная;
- 4 – соединений;
- 5 – подключения;
- 6 – общие;
- 7 – расположения;
- 8 – прочие;
- 0 – объединённые.

Наименование схемы определяется её видом и типом, например:

- схема электрическая структурная – Э1;
- схема электрическая функциональная – Э2;
- схема электрическая принципиальная – Э3.

*Структурные* схемы определяют основные функциональные части изделия, их назначение и взаимосвязи. Эти схемы разрабатываются раньше других схем и используют для общего ознакомления с изделием.

*Функциональные* схемы разъясняют определённые процессы, протекающие в отдельных функциональных цепях изделия или во всём изделии в целом. Этими схемами пользуются для изучения принципов работы изделий, а также при наладке, регулировке, контроле и ремонте изделия.

Схемы выполняются без соблюдения масштаба, действительное пространственное расположения составных частей изделия не учитывается или учитывается приближённо.

## 8.4. Схемы электрические принципиальные

Электрическая принципиальная схема определяет полный состав элементов и связей между ними и даёт детальное представление о принципах работы изделия. Она служит исходным документом для разработки конструкции РЭА и других конструкторских документов, в том числе чертежей изделий. Принципиальные схемы используются для изучения принципов работы изделия, а также при их наладке, регулировке, контроле и ремонте. В качестве примера на рис. 8.1 приведена принципиальная схема источника опорного напряжения (ИОН).

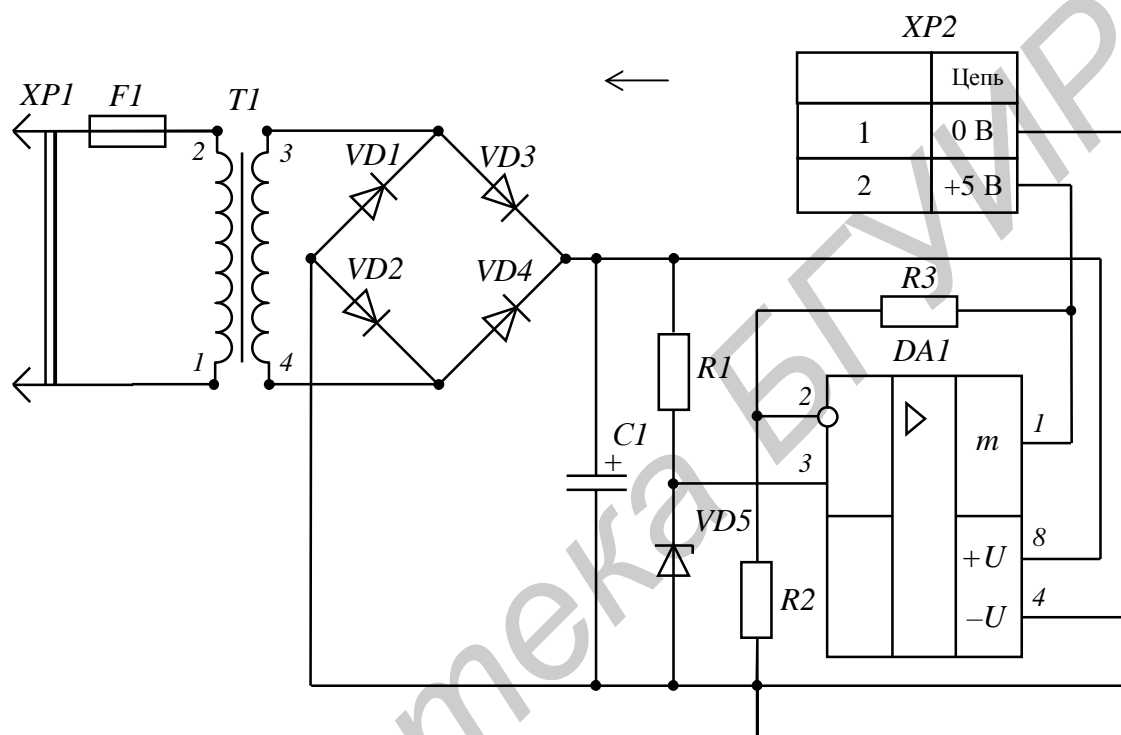


Рис. 8.1. Электрическая принципиальная схема ИОН

Позиционные обозначения элементов проставляют на схемах рядом с их графическими обозначениями с правой стороны или над ними.

При указании около условных графических обозначений номиналов резисторов и конденсаторов допускается применять упрощенный способ обозначения единиц измерений. Например, для резисторов:

- от 0 до 999 Ом – без указания единиц измерения;
- от  $1 \cdot 10^3$  до  $999 \cdot 10^3$  Ом – в килоомах с обозначением единицы измерения строчной буквой К;
- от  $1 \cdot 10^6$  до  $999 \cdot 10^6$  – в мегаомах с обозначением единицы измерения прописной буквой М;
- свыше  $1 \cdot 10^9$  – в гигаомах с обозначением единицы измерения прописной буквой Г.

Для конденсаторов:

- от 0 до  $9999 \cdot 10^{-12}$  Ф – в пикофарадах без указания единицы измерения;
- от  $1 \cdot 10^{-8}$  до  $9999 \cdot 10^{-6}$  Ф – в микрофарадах с обозначением единицы измерения буквами мкФ.

Номинальная мощность рассеяния резисторов обозначается условными знаками (рис. 8.2).

Общие требования к выполнению схем устанавливает ГОСТ 2.701-84. Примеры выполнения основных разновидностей схем изложены, например, в справочном пособии [7]. В качестве примера на рис. 8.3 представлена электрическая структурная схема источника опорного напряжения в соответствии с рис. 8.1.

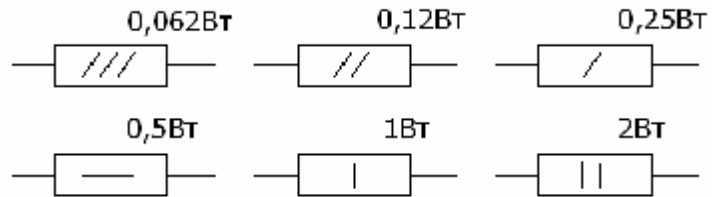


Рис. 8.2. Условные знаки для обозначения номинальной мощности рассеяния резисторов

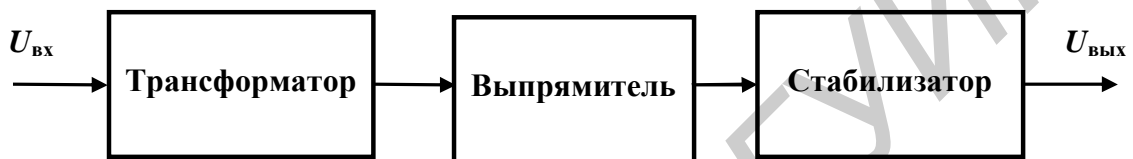


Рис. 8.3. Электрическая структурная схема источника опорного напряжения

Все сведения об элементах, входящих в состав изделия и изображенных на электрической принципиальной схеме, записывают в *перечень элементов*, который выполняют в виде самостоятельного документа или помещают на первом листе схемы.

В первом случае (самостоятельный документ) перечень элементов выполняют на листах формата А4 с присвоением шифра, состоящего из буквы П (перечень) и шифра схемы, к которой оформляется перечень, например, ПЭЗ – перечень элементов принципиальной электрической схемы.

Во втором случае перечень оформляют в виде таблицы по определенной форме над основной надписью, на расстоянии не менее 12 мм от неё. Продолжение перечня (если это необходимо) помещают слева от основной надписи, повторяя заглавную часть таблицы.

Фрагмент перечня элементов показан на рис. 8.4.

## 8.5. Текстовые документы

К текстовым документам относится расчётно-пояснительная записка. В этом документе излагаются сведения о результатах выполненной работы по проектированию изделия с приложением (при необходимости) графических документов.

Пояснительная записка выполняется на листах формата А4. Она в общем случае должна включать следующие разделы:

- введение с указанием, на основании каких документов разработан проект;
- назначение и область применения проектируемого изделия;
- техническая характеристика;

- описание и обоснование выбранной конструкции;
- расчёты, подтверждающие работоспособность и надёжность конструкции;
- описание организации работ с применением разрабатываемого изделия;
- ожидаемые технико-экономические показатели;
- уровень нормализованной оценки или унификации.

Поз. обознач.	Наименование	Кол.	Примечание
C1	Конденсатор ECR 220μF 25V	1	«HITANO», VISHAY» 220 мкФ ±20%
DA1	Микросхема КР1040УД1 КФУЛ.431136.005ТУ	1	
	Резисторы С2-33Н ОЖО.467.173ТУ		
R1	С2-33Н-750 Ом ±5% -А-В-В	1	
R2	С2-33Н-15,0 кОм ±5% -А-В-В	1	
R3	С2-33Н-10,0 кОм ±5% -А-В-В	1	

Рис. 8.4. Фрагмент перечня элементов

Общие требования к текстовым документам регламентируются ГОСТ 2.105-95, формы и правила выполнения – ГОСТ 2.106-68.

## 8.6. Комплектность конструкторских документов

Конструкторская документация бывает текстовой и графической. Номенклатура (перечень) документации, выполняемой на том или ином этапе проектирования деталей, сборочных единиц, комплексов и комплектов, указана в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Номенклатура конструкторских документов для различных этапов проектирования РЭС

Наименование документа	Шифр	Техническое предложение	Эскизный проект	Технический проект	Рабочая документация на изделия			
					Детали	Сбор. единицы	Комплексы	Комплекты
Чертёж детали	–	–	–	+	(+)	–	–	–
Сборочный чертёж	СБ	–	–	–	–	(+)	–	–
Чертёж общего вида	ВО	+	+	(+)	–	–	–	–

Наименование документа	Шифр	Техническое предложение	Эскизный проект	Технический проект	Рабочая документация на изделия			
					Детали	Сбор. единицы	Комплексы	Комплекты
Теоретический чертёж	ТЧ	–	+	+	+	+	+	–
Габаритный чертёж	ГЧ	+	+	+	+	+	+	–
Монтажный чертёж	МЧ	–	–	–	–	+	+	+
Электромонтажный чертёж	МЭ	–	–	–	–	+	–	–
Схемы	ГОСТ 2.701	+	+	+	–	+	+	+
Спецификация	–	–	–	–	–	(+)	(+)	(+)
Ведомость покупных изделий	ВП	–	–	–	–	+	+	+
Пояснительная записка	ПЗ	(+)	(+)	(+)	–	–	–	–
Технические условия	ТУ	–	–	+	+	+	+	+
Программа и методика испытаний	ПМ	–	–	–	+	+	+	–
Таблицы	ТБ	+	+	+	+	+	+	+
Расчёты	РР	+	+	+	+	+	+	+
Инструкции	И...	–	–	–	+	+	+	+

*Примечание.* (+) – обязательный документ; «+» – документ составляется по усмотрению разработчика; «–» – документ не составляется.

Обязательными чертежами рабочей документации являются чертежи деталей и сборочные чертежи. На каждую деталь и сборочную единицу выполняются отдельный рабочий чертёж с основной надписью.

Рабочий чертёж должен содержать все сведения для изготовителя и контроля изделия:

- графические изображения, полностью отражающие его форму;
- необходимые размеры с предельными отклонениями;
- указания о шероховатости поверхностей;
- технические требования, содержащие различные данные, которые невозможно представить графически.

Текстовые технологические требования записывают в тех случаях, когда они являются единственными гарантирующими качество изделия, например, технологию склеивания, совместной обработки деталей и т.д.

## 8.7. Технические требования и техническая характеристика

Эти данные располагают над основной надписью. На листах формата более А4 допускается размещение текста в две и более колонки. Пункты технических требований и технической характеристики должны иметь самостоятельную нумерацию. Общая ширина колонки должна быть не более 185 мм.

*Технические требования* на чертеже излагают, группируя однородные и близкие по своему характеру требования по возможности в такой последовательности:

- 1) требования, предъявляемые к материалу, заготовке, термической обработке и к свойствам материала готовой детали (например твёрдость), указание материалов заменителей;
- 2) размеры (формовочные и штамповочные уклоны, радиусы и пр.), предельные отклонения размеров, не указанных на чертеже, и т.д.;
- 3) требования к качеству поверхностей (отделка, покрытия);
- 4) зазоры, расположение отдельных элементов конструкции;
- 5) требования, предъявляемые к настройке и регулированию изделия;
- 6) другие требования к качеству изделий, например, бесшумность, виброустойчивость и т.д.;
- 7) условия и методы испытаний;
- 8) указания о маркировании и клеймении;
- 9) правила транспортирования и хранения;
- 10) особые условия эксплуатации.

*Техническая характеристика* изделия размещается отдельно от технических требований и имеет самостоятельную нумерацию пунктов. Пример технической характеристики – диапазон принимаемых волн (частот), выходная мощность и т.д.

На поле чертежа могут размещаться и таблицы. Их размещают на свободном поле чертежа справа или ниже изображения изделия. Содержанием таблиц могут быть данные, например, о числе витков и диаметре провода обмоток трансформатора и др.

## 8.8. Размеры, допуски и посадки на чертежах

Размерные числа, нанесённые на чертеже, должны однозначно определять размеры изделия и его элементов. Размеры, как правило, проставляют от баз. Для каждого размера указывают предельные отклонения. Разновидности баз могут быть следующие:

- технологическая, используемая для определения положения заготовки или изделия в процессе изготовления или ремонта;
- конструкторская, используемая для определения положения детали или сборочной единицы в изделии;
- измерительная, определяющая относительное положение заготовки или изделия и средств измерения.

Базами могут служить кромки плоских деталей, торцы круглых деталей, оси симметрии и др. Установлены два способа нанесения размеров от баз:

- координатный, когда размеры наносятся от одной, основной базы или от нескольких баз лесенкой (рис. 8.5, а);
- цепной, когда размеры наносятся цепочкой, исключая один из размеров той части детали, которая не подвергается обработке и имеет самый большой допуск на размер (рис. 8.5, б).

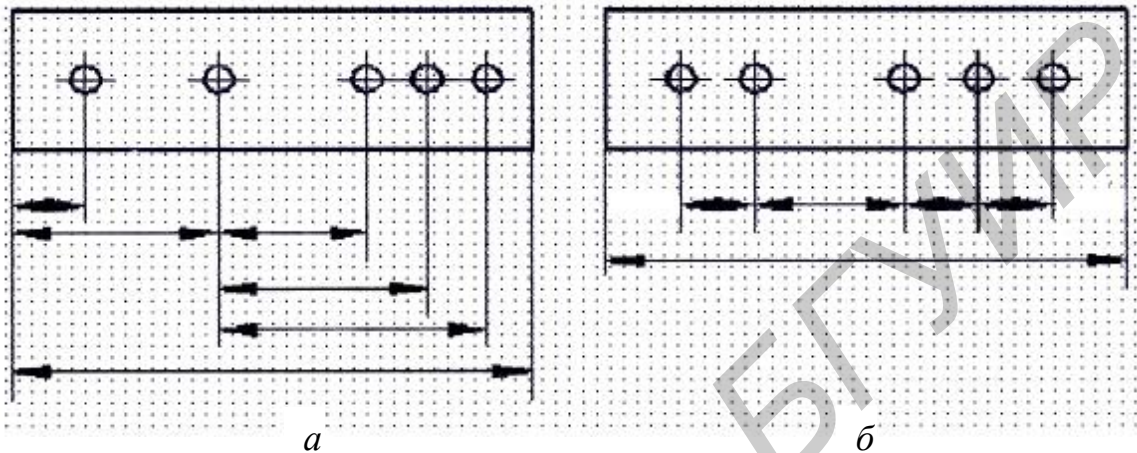


Рис. 8.5. Способ нанесения размеров от баз

Нанесение размеров в виде замкнутой цепи допускается только в том случае, когда один из них указывается как справочный. Справочный размер отмечают на чертежах знаком «\*», а в технических требованиях записывают: *\*Размер для справок*. Этот размер не выполняется по данному чертежу и указывается для большего удобства пользования чертежом.

Понятие о допусках и посадках для различных видов соединений основывается на некоторых терминах и определениях (рис. 8.6).

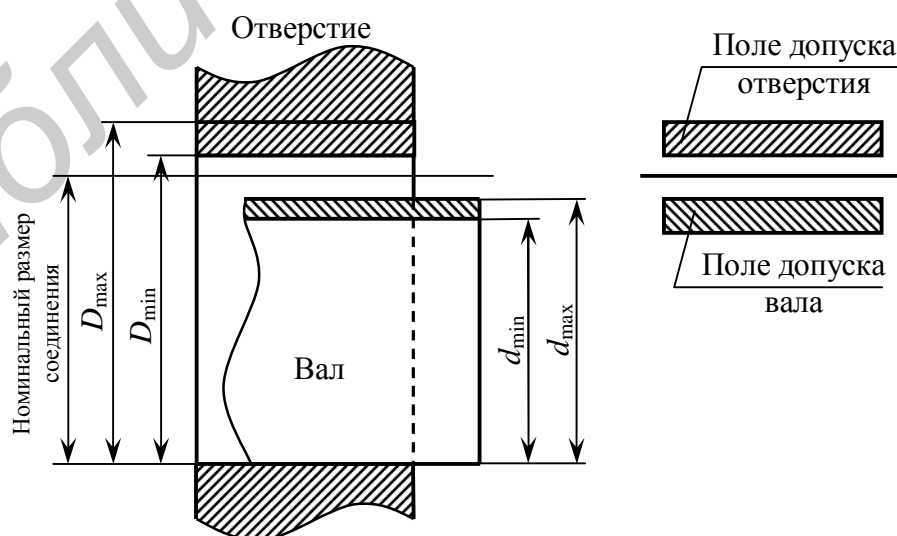


Рис. 8.6. Расположение полей допусков отверстия и вала при посадке с зазором

Допуск – разность между наибольшим и наименьшим предельными размерами. Предельные отклонения линейных размеров на чертежах указывают одним из трёх способов (рис.8.7):

- условными обозначениями полей допусков;
- числовыми значениями предельных отклонений;
- условными обозначениями полей допусков с указанием справа в скобках числовых значений предельных отклонений.

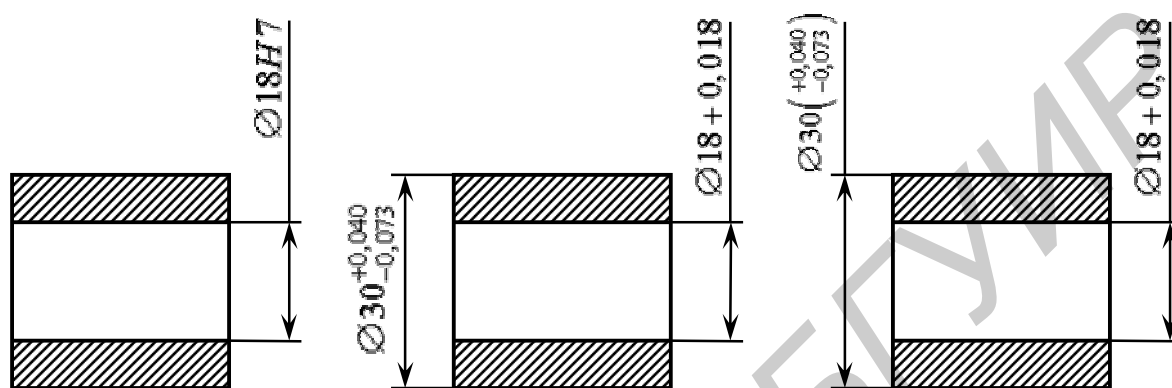


Рис. 8.7. Варианты обозначений на чертежах предельных отклонений линейных размеров

Условное обозначение состоит из буквы, определяющей положение допуска относительно номинального размера, и цифры, соответствующей номеру квалитета.

*Номинальный размер* – размер, относительно которого определяются предельные размеры и который служит также началом отсчёта отклонений.

*Квалитет* (степень точности) – ступень градации значений допусков системы. Установлено 19 квалитетов, которые имеют номер 01, 0, 1, 2,...17, 18. Они образуют единую шкалу точностей в машино- и приборостроении. Ориентировочная применяемость квалитетов: квалитеты 01...7 – допуски средств измерения, квалитеты 4...12 – допуски размеров в посадках; квалитеты 12...18 – допуски неответственных размеров (несопрягаемых или в грубых соединениях). Поля допусков отверстий обозначаются прописными, валов – строчными буквами латинского алфавита.

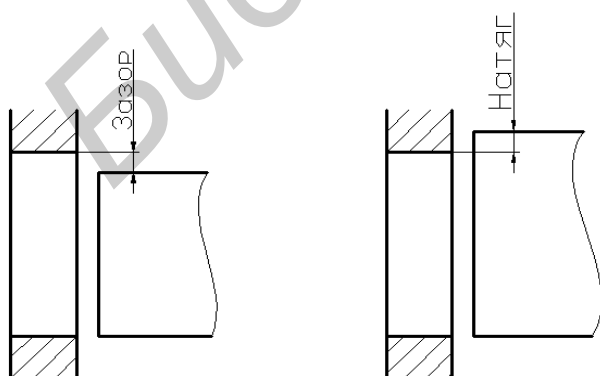


Рис. 8.8. Схема зазора и натяга

*Посадка* – характер соединения деталей, определяемый величиной получающихся в нем зазоров или натягов (рис. 8.8). Возможны посадки с зазором, с натягом и переходные посадки, когда возможно получение как зазоров, так и натягов.



Предельные отклонения размеров деталей, изображённых на чертеже в сборе (посадки), указывают в виде дроби: в числителе – для отверстия, в знаменателе – для вала (рис. 8.9).

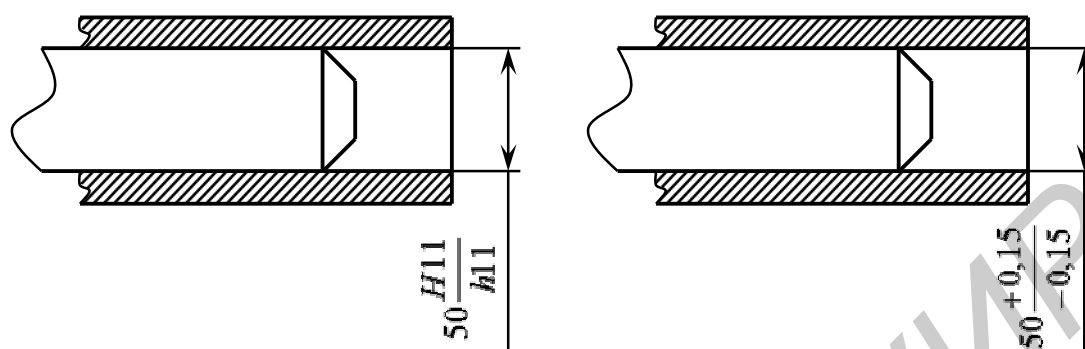


Рис. 8.9. Условное обозначение посадки

Многократно повторяющиеся на чертежах предельные отклонения относительно низкой точности (от 12-го квалитета и грубее) относительно номинальных размеров допускается не наносить, а оговаривать общей записью в технических требованиях в одном из вариантов:

«Неуказанные предельные отклонения размеров: отверстий – по H14, валов – по h14, остальных –  $\pm \frac{IT\ 12}{2}$ »;

«Неуказанные предельные отклонения размеров  $\pm \frac{IT\ 14}{2}$ ».

Обозначение  $\pm \frac{IT}{2}$  рекомендуется для симметричных отклонений потому, что оно распространяется на размеры различных элементов, которые не относятся к валам и отверстиям (расстояние между осями и т.д.)

В процессе проектирования используется 3 метода выбора допусков и посадок на детали и сборочные единицы:

1. *Метод прецедентов* заключается в том, что в чертежах на детали различных изделий, находящихся в эксплуатации, находят однотипные детали и по ним определяют допуски на размеры проектируемой детали.

2. *Метод подобия*. Используя классификационные документы, устанавливают аналог проектируемой детали и по нему определяют допуски и посадки на проектируемое изделие.

Общими недостатками методов прецедентов и подобия являются риск использования неправильно установленных ранее допусков и посадок, сложность определения признаков для выбора аналогов.

3. *Расчётный метод*. Для повышения точности и надёжности детали целесообразно при проектировании максимально приблизить размеры детали к расчётным значениям. Однако при этом подходе могут возникать трудности технологического и метрологического характера. Обработка детали по более

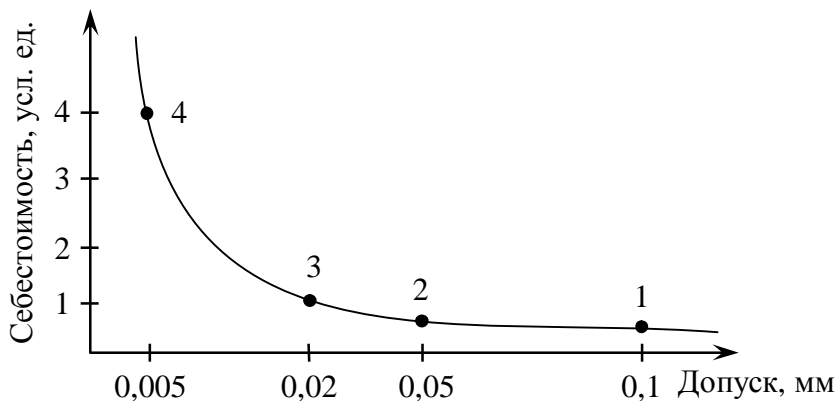


Рис. 8.10. Зависимость между стоимостью и точностью обработки:

1 – холодное волочение; 2 – обработка на токарном станке; 3 – обработка и шлифование; 4 – обработка, шлифование и притирка

точному допуску требует более сложного оборудования, дорогого инструмента и высокой квалификации рабочего. Таким образом, требования к точности и стоимости находятся в противоречии, что иллюстрируется рис. 8.10.

При конструкторском проектировании деталей и сборочных единиц для установления обоснованных допусков

необходимы технико-экономические расчёты.

### 8.9. Параметры шероховатости и их обозначение на чертежах

Шероховатость – одна из основных геометрических характеристик качества поверхности деталей, оказывающая влияние на эксплуатационные показатели. Требования к шероховатости поверхности должны устанавливаться исходя из функционального назначения поверхности для обеспечения заданного качества изделий.

Шероховатость поверхности оценивается по неровностям профиля, получаемого путём сечения реальной поверхности плоскостью.

В практике проектирования деталей РЭС наиболее часто используются два параметра шероховатости –  $R_z$  и  $R_a$ .

$R_z$  – высота неровностей профиля по десяти точкам, выражаемая в микронах.  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля в микронах. Некоторые рекомендации по выбору шероховатости поверхностей приведены в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Рекомендации по выбору шероховатости поверхностей

Шероховатость	Рекомендации по применению
$R_z$ 320	Очень грубые поверхности, не подвергающиеся механической обработке, например поверхности отливок хорошего качества
$R_z$ 160	
$R_z$ 80	Грубые, не соприкасающиеся друг с другом поверхности. Отверстия на проход крепежных деталей
$R_z$ 40	Свободные поверхности валов, втулок. Поверхности головок винтов
$R_z$ 20	Поверхности деталей, прилегающие к поверхностям других деталей, не трущиеся и не подвергающиеся износу
$R_a$ 2,5	Прилегающие друг к другу, но не трущиеся поверхности высокого качества

Шероховатость	Рекомендации по применению
$R_a 1,25$	Трущиеся поверхности при невысоких требованиях к стабильности зазора
$R_a 0,63$	Соприкасающиеся поверхности, противостоящие износу
$R_a 0,32$	Соприкасающиеся и декоративные поверхности особо высокого качества
$R_a 0,16$	Притираемые поверхности

Используется три основных способа регламентации конструктором качества поверхности, в том числе шероховатости:

- 1) по прототипу (метод прецедентов);
- 2) расчётный;
- 3) экспериментальный.

Обозначение шероховатостей поверхностей на чертежах:

∇ – поверхность, не обрабатываемая по данному чертежу;

√ – поверхности, вид обработки которых конструктором не устанавливается;

∇ – поверхности, вид обработки которых определён конкретно, например, точение или фрезерование;

$R_a 0,025 \sqrt{\text{Полировать}}$  – поверхности, вид обработки которых является единственным.

Значение параметра шероховатости указывают в обозначении шероховатости. Ниже приводятся примеры указания шероховатости. Для параметра  $R_a$ :  $\sqrt{R_a 0,32}$ , для параметра  $R_z$ :  $\sqrt{R_z 80}$ .

### 8.10. Сборочные чертежи и их содержание

Сборочный чертеж должен содержать:

- изображение сборочной единицы, позволяющее осуществить её сборку и контроль;
- размеры, предельные отклонения и другие параметры и требования, которые должны быть выполнены или проконтролированы по сборочному чертежу;
- указания о выполнении разъёмных соединений, если точность сопряжения достигается пригонкой или подбором, и методах и характере сопряжения;
  - номера позиций составных частей, входящих в изделие;
  - габаритные, установочные, присоединительные и другие необходимые справочные размеры;
  - техническую характеристику изделия (при надобности);
  - координаты центра тяжести (при необходимости).

Как правило, сборочные чертежи выполняют с упрощениями. Например, допускается выполнять изображение одной из нескольких одинаковых частей, а изображения остальных давать упрощённые, в виде внешних очертаний. На разрезах изображают нерассечёнными составные части, на которые оформлены самостоятельные сборочные чертежи.

Типовые, покупные и другие широко применяемые изделия и элементы изображают внешними очертаниями. На сборочных чертежах допускается не показывать:

- фаски, проточки, углубления, выступы, накатки и другие мелкие элементы;
- зазоры между стержнями и отверстиями;
- крышки, щиты, кожухи, перегородки и т.д., если необходимо показать закрытые или составные части изделия. В этом случае над изображением делают соответствующую надпись, например, «Крышка поз. 5 не показана»;
- надписи на табличках, шкалах и других подобных деталях, изображая только их контур.

Составным частям изделия присваивают номера позиций и указывают их в спецификации. На сборочном чертеже номера позиций указывают на изображениях составных частей, видимых на основных видах и заменяющих их разрезах. На выносных полках номера позиций располагают параллельно основной надписи чертежа вне контура изображения и группируют их в колонку или строчку по возможности на одной линии. Проставляют их, как правило, один раз. Иногда допускается указывать повторно номера позиций одинаковых составных частей. Шрифт позиций должен быть на 1–2 пункта больше, чем размер шрифта для размерных чисел на том же чертеже.

Допускается делать общую линию-выноску с вертикальным расположением номеров позиций: для группы крепёжных деталей (винт, шайба, гайка), относящихся к одному и тому же месту крепления, и для группы деталей с отчётливо выраженной взаимосвязью. На сборочных чертежах указывают следующие размеры:

- габаритные – длина, ширина, высота;
- монтажные – размеры, определяющие взаимное расположение составных частей сборочной единицы;
- установочные – размеры, которые определяют присоединение изделий друг к другу, или к устройству;
- эксплуатационные – диаметры проходных отверстий и др.

Габаритные, установочные, присоединительные, размеры движущихся частей изделия относятся к справочным. Их обозначают звездочкой «\*», а в технических требованиях сборочного чертежа делают запись

*\*Размеры для справок.*

## 8.11. Спецификация и порядок её оформления

*Спецификация* – документ, определяющий состав изделия и всей конструкторской документации, относящейся к этому изделию. Её составляют и оформляют на отдельных листах формата А4 на каждую сборочную единицу, комплекс и комплект.

В зависимости от состава изделия спецификация может состоять из разделов, которые следует располагать сверху вниз в такой последовательности:

- документация;
- комплексы;
- сборочные единицы;
- детали;
- стандартные изделия;
- прочие изделия;
- материалы;
- комплекты.

Наличие тех или иных разделов определяется составом специфицируемого изделия. Наименования разделов записываются в виде заголовков в графе «Наименование» строчными буквами (кроме первой прописной) и подчеркивают. Ниже и выше заголовка оставляют одну свободную строку. В раздел «Документация» вносят документы, составляющие основной комплект конструкторских документов специфицируемого изделия (см. ГОСТ 2.102–68), кроме его спецификации, ведомости эксплуатационных документов и ведомости документов для ремонта. С подробным пояснением заполнения этого и других разделов спецификации можно ознакомиться в ГОСТ 2.102–68. В табл. 8.4 приводится пример спецификации применительно к сборочной единице: печатной плате с устанавливаемыми на ней элементами согласно электрической схеме (см. рис. 8.2), кроме элементов *XP1* и *FU1*, установка которых на печатную плату не предусматривается. Маломощный трансформатор *T1* устанавливается на печатную плату и крепится к ней винтовыми соединениями.

Таблица 8.4

Пример оформления спецификации

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примеч.
				<u>Документация</u>		
A2			БГУИ.436231.001 СБ	Сборочный чертёж		
A4			БГУИ.436231.001 ЭЗ	Схема электрическая		
				принципиальная		
A4			БГУИ.436231.001 ПЭЗ	Перечень элементов		

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примеч.
				<u>Сборочные единицы</u>		
A2		1	БГУИ.671111.001	Трансформатор	1	T1
				<u>Детали</u>		
A3		3	БГУИ.687252.001	Плата печатная	1	
				<u>Стандартные изделия</u>		
		5		Винт М3-6гх6.36.016 ГОСТ 17473-80	4	
		6		Гайка М3-6Н.06.40Х.016 ГОСТ 5916-70	4	
		7		Шайба 3.01.08кп.016 ГОСТ 11371-78	4	
				<u>Прочие изделия</u>		
		9		Микросхема КР1040УД1 КФУЛ.431136.005 ТУ	1	DA1
		10		Диод FR207	4	VD1...VD4 «MICROSEMI»
		11		Стабилитрон ВZX79-С3V0	1	VD5 «PHILIPS» 0,5 Вт, 3 В
		12		Конденсатор ECR 220μF 25V	1	C1 «HITANO», «VISHAY»
				Резисторы ОЖО.467.173ТУ		
		13		C2-33H-750 Ом ±5% -A-B-B	1	R1
		14		C2-33H-10,0 кОм ±5% -A-B-B	1	R3
		15		C2-33H-15,0 кОм ±5% -A-B-B	1	R2
		16		Вилка WH 2,5-2	1	XP2 «HLEL»

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примеч.
				<u>Материалы</u>		
		18		Провод монтажный НВ-0,35 500 ГОСТ 17515-72 $l = 55$ мм	4	
		19		Трубка ПВХ ТВ 40(305) 5,0 x 0,6 ГОСТ 19034-82 $l = 6$ мм	4	

*Примечания:* 1. Основная надпись заглавного листа и основные надписи последующих листов спецификации (используемые для обозначения документа и нумерации листов) условно не показаны.

2. В раздел «Материалы» не записывают материалы, необходимое количество которых не может быть определено конструктором по размерам элементов изделия и вследствие этого устанавливается технологом. К таким материалам относят, например: лаки, краски, клей, смазки, замазки, припой, электроды. Указание о применении таких материалов дают в технических требованиях на поле чертежа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенный в учебно-методическом пособии материал не исчерпывает все направления работы конструктора, принципы и методы конструирования РЭА, которые используются в настоящее время. Перед конструктором РЭА стоят проблемы дальнейшего развития методов конструирования, связанные в основном с необходимостью микроминиатюризации, повышения надёжности и с переводом значительной части аппаратуры на цифровые методы обработки информации. Переход к цифровым методам обработки сигналов значительно увеличивает число элементов и электромонтажных связей между различными электронными устройствами, что усложняет решение задач обеспечения надёжности и обуславливает дальнейшую микроминиатюризацию монтажа. Перед конструктором РЭА стоит также задача совершенствования теплоотводящих конструкций, что вызвано высокой плотностью упаковки элементов в РЭА.

Работа по проектированию РЭА становится неэффективной без дальнейшего развития и совершенствования автоматизированных методов конструирования.

Методология конструирования РЭА продолжает совершенствоваться в связи с ростом степени интеграции элементной базы и из-за стирания чётких границ между системотехническим, схемотехническим, конструкторским и технологическим проектированием. Внедрение РЭА во все сферы человеческой деятельности, встраивание в различные конструкции машин, приборов и оборудования порождает огромное количество конструкторско-технологических решений, что снижает эффективность их использования: замедляет темпы разработки, производства и внедрения, снижает уровень серийнопригодности, повышает стоимость и т.д.

Решением этой проблемы может быть межвидовая унификация машин, приборов и оборудования, обеспечивающая вариантность по физическим и электрическим параметрам, гармоничное сочетание различных конструктивных единиц без дополнительных расходов на стыковку, соответствие международным стандартам и т.д.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизированное проектирование узлов и блоков РЭС средствами современных САПР : учеб. пособие для вузов / И. Г. Мироненко [и др.]; под ред. И. Г. Мироненко. – М. : Высш. шк., 2002.
2. Каленкович, Н. И. Проектирование РЭС с учётом механических воздействий : учеб. пособие по курсу «Конструирование радиоэлектронных средств» для студ. спец. «Проектирование и производство радиоэлектронных средств»/ Н. И. Каленкович. – Минск. : БГУИР, 1999.
3. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры : учебник для вузов / К. И. Билибин [и др.]; под ред. В. А. Шахнова. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002.
4. Ненашев, А. П. Конструирование радиоэлектронных средств : учебник для радиотехн. спец. вузов / А. П. Ненашев. – М. : Высш. шк., 1990.
5. Основы конструирования изделий радиотехники : учеб. пособие для студ. спец. Э.03.01.00 «Экономика и управление предприятием» днев. и заоч. форм обуч. / Ж. С. Воробьева [и др.]. – Минск. : БГУИР, 2001.
6. Пикуль, М. И. Конструирование и технология производства ЭВМ : учебник / М. И. Пикуль, И. М. Русак, Н. А. Цырельчук. – Минск. : Высш. шк., 1996.
7. Романычева, Э. Т. Разработка и оформление конструкторской документации РЭА : справ. пособие / Э. Т. Романычева, А. К. Иванова, А. С. Кумеков. – М. : Радио и связь, 1984.
8. VDI/VDE 2256, Blatt2, Feinwerkelemente, Dämpfungen, Stoßdämpfungen, Januar 1987 (Стандарт ФРГ).
9. Шимкович, А. А. Конструирование несущих конструкций РЭС и защита их от дестабилизирующих факторов. В 2 ч. Ч.1 : Конструирование радиоэлектронных устройств : учеб. пособие для студ. спец. «Проектирование и производство радиоэлектронных средств» / А. А. Шимкович. – Минск. : БГУИР, 1999.
10. Варламов, Р. Г. Компоновка радиоэлектронной аппаратуры / Р. Г. Варламов. – М. : Сов. радио, 1975. – 352 с.
11. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности : учеб. для студ. инж.-тех. спец. вузов / С. М. Боровиков. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.
12. European Organization of the Quality Control Glassary. – Bern : EOQC. 1988. – 24 p.
13. Надёжность технических систем : справочник /Ю. К. Беляев [и др.] ; под ред. И. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с.
14. Надёжность и эффективность в технике : справочник. В 10 т. / ред. совет : В. С. Авдусевский (пред.) [и др.]. Т. 2: Математические методы в теории надёжности и эффективности ; под ред. Б. В. Гнеденко. – М. : Машиностроение, 1987. – 280 с.

15. Прытков, С. Ф. Надёжность электрорадиоизделий : справочник / С. Ф. Прытков [и др.]; науч. рук. авт. колл. С. Ф. Прытков. – М. : ФГУП «22 ЦНИИ МО РФ», 2004. – 574 с.

16. Надёжность электрорадиоизделий : справочник / С. Ф. Прытков [и др.] // науч. рук. авт. колл. С. Ф. Прытков. – М. : ФГУП «22 ЦНИИ МО РФ», 2008. – 641 с.

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

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

Библиотека БГУИР

*Учебное издание*

**Каленкович** Николай Иванович  
**Боровиков** Сергей Максимович  
**Ткачук** Аркадий Мефодьевич  
**Образцов** Николай Сергеевич

***РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА  
И ОСНОВЫ ЕЁ КОНСТРУКТОРСКОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ***

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *Н. В. Гриневич*  
Корректор *Е. Н. Батурчик*  
Компьютерная верстка *Е. С. Чайковская*

Подписано в печать 25.05.2009. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Печать ризографическая. Усл. печ. л. 11,04. Уч.-изд. л. 11,0. Тираж 200 экз. Заказ 404.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6