

Министерство науки и образования Российской Федерации

Воронежский государственный технический университет

**А.Т. Болгов, С.М. Пасмурнов**

**ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

**Учебное пособие**

**ВОРОНЕЖ 2004**

УДК 681.3

Болгов А.Т., Пасмурнов С.М. Основы проектирования радиоэлектронных средств: Учебное пособие. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2004. 138 с.

В учебном пособии рассматриваются этапы проектирования радиоэлектронных средств (РЭС). Описывается реализация системного подхода этого процесса, обеспечивающая рациональное проектирование и достижение в дальнейшем ожидаемых результатов. Рассматриваются вопросы защиты элементов и узлов РЭС от внешних и внутренних возмущающих воздействий. Предлагаются методы оценки надежности, качества РЭС, рассматриваются технологические процессы используемые при производстве РЭС. Приводятся основные положения патентного законодательства. Издание предназначено для студентов специальностей "Проектирование и технология радиоэлектронных средств", "Радиотехника", "Системы автоматизированного проектирования".

Табл.15 Илл.61 Библиограф.: 18

Научный редактор д-р. техн. наук, проф. А. В. Муратов

Рецензенты: технический совет АООТ "Электросигнал",

главный инженер А. Д. Веревкин,

д-р. техн. наук, проф. А. А. Рындин.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета.

© Болгов А.Т., Пасмурнов С.М., 2004

© Оформление. Воронежский государственный  
технический университет, 2004

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Общая характеристика и проблемы проектирования РЭС	5
1.1. Этапы развития конструкции РЭС	5
1.2. Классификация РЭС	6
1.3. Проблемы проектирования РЭС	7
2. Основные этапы проектирования РЭС	9
2.1. Системный подход при проектировании РЭС	9
2.1.1. Реализация системного подхода в технологическом процессе производства РЭС	11
2.1.2. Реализация системного подхода при конструировании РЭС	12
2.2. Основные этапы научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР)	13
2.2.1. Основные этапы разработки РЭС	13
2.2.2. Основные этапы НИОКР	13
2.3. Конструкторская документация	15
2.4. Этапы процесса проектирования	17
3. Тепломассообмен в РЭС	21
3.1. Физические процессы, влияющие на функционирование РЭС, их особенности и взаимосвязь	21
3.2. Законы теплопроводности, конвекции и излучения	23
3.3. Сложный теплообмен и построение тепловых моделей конструкций РЭС	25
3.4. Общие методы расчета температурных режимов работающих РЭС	27
3.5. Способы обеспечения нормального теплового режима РЭС	37
3.6. Выбор способа охлаждения	39
4. Защита от механических воздействий	40
4.1. Механические нагрузки, действующие на РЭС в процессе эксплуатации	40
4.2. Влияние механических воздействий на функционирование РЭС	41
4.3. Защита РЭС от механических воздействий методом виброизоляции	43
4.4. Защита РЭС от механических воздействий, обеспечение прочности и жесткости элементов конструкций	46
5. Защита РЭС от атмосферных воздействий	47
5.1. Влияние влаги на эффективность и качество конструкций РЭС	47
5.2. Защита от влаги элементов и узлов РЭС монолитными оболочками	51
5.3. Защита от влаги элементов и узлов РЭС полыми оболочками	59
6. Действие проникающей радиации на РЭС	60
6.1. Ионизирующая радиация и ее воздействие на вещество	60
6.2. Влияние облучения на конструкционные материалы	61
6.3. Влияние ионизирующего облучения на резисторы	62
6.4. Влияние ионизирующего облучения на конденсаторы	63
6.5. Влияние радиации на полупроводниковые приборы	66
6.6. Воздействие радиации на транзисторы	66
7. Электромагнитная совместимость РЭС	68
7.1. Проблемы помехоустойчивости РЭС	68
7.2. Виды и эквивалентные схемы паразитных связей	69
7.3. Обеспечение электромагнитной совместимости РЭС экранированием	71

7.4. Фильтрация как способ ослабления помех	75
7.5. Заземление	76
<b>8. Надежность РЭС, методы оценки и обеспечения</b>	<b>80</b>
8.1. Основные понятия теории надежности РЭС	80
8.2. Причины возникновения отказов РЭС	81
8.3. Математические методы оценки РЭС	82
8.4. Классификация РЭС по показателям надежности	84
8.5. Оценка надежности неремонтируемых РЭС	85
8.6. Оценка надежности ремонтируемых РЭС	85
8.6.1. Ремонтируемые РЭС, невосстанавливаемые в процессе эксплуатации	85
8.6.2. Ремонтируемые РЭС, восстанавливаемые в процессе эксплуатации	86
8.7. Оценка параметрической надежности	86
8.8. Обеспечение надежности РЭС на этапах проектирования	86
8.8.1. Обеспечение надежности РЭС на этапах схемотехнического проектирования	86
8.8.2. Обеспечение надежности РЭС на этапах конструкторского проектирования	87
8.8.3. Резервирование РЭС	89
<b>9. Контроль и прогнозирование качества РЭС</b>	<b>90</b>
9.1. Качество. Основные понятия и определения	90
9.2. Статистический контроль качества	91
9.3. Прогнозирование параметров качества вероятностными и детерминистскими методами	94
9.4. Управление качеством РЭС на предприятии	97
<b>10. Вопросы теории точности производства</b>	<b>99</b>
10.1. Производственные погрешности	99
10.2. Расчетно-аналитический метод анализа точности производства	99
10.3. Статистические методы анализа точности производства	101
<b>11. Технологические процессы производства РЭС</b>	<b>108</b>
11.1. Основные понятия и определения	108
11.2. Оценка технологичности конструкций РЭС	110
11.3. Автоматизация технологических процессов	112
11.4. Контроль технологических процессов	114
11.5. Технологический процесс изготовления печатных плат	114
<b>12. Технологические процессы производства интегральных схем</b>	<b>119</b>
12.1. Классификация интегральных микросхем по их конструктивно-технологическим особенностям	119
12.2. Конструкция и технология полупроводниковых микросхем	121
12.3. Технологический процесс производства тонкопленочных гибридных интегральных микросхем	125
12.4. Технологический процесс производства толстопленочных микросхем	129
<b>13. Патентно-правовые требования и изобретательское творчество</b>	<b>135</b>
13.1. Основные положения патентного законодательства	135
13.2. Патентно-правовые показатели конструкции РЭС	138

## ВВЕДЕНИЕ

Ускорение научно-технического прогресса неразрывно связано с уровнем развития радиоэлектронных средств (РЭС) различного назначения, сокращением сроков их разработки, внедрением в производство и эксплуатацию. Проектирование и технология, являясь важнейшими составными частями процесса создания РЭС, представляют сложный комплекс взаимосвязанных задач, решение которых возможно только на основе системного подхода с использованием знаний схемотехники, САПР, теплофизики и других теоретических и прикладных дисциплин. Основная задача проектирования и технологии производства РЭС – физическая реализация схемы, при которой обеспечиваются параметры РЭС установленные в техническом задании. Получение заданных параметров РЭС связано с решением таких задач как обеспечение помехоустойчивости и надежности, защита от внешних воздействий, минимизация потребляемой энергии и др.

Анализ учебной и научно-технической литературы, освещающей вышеуказанные задачи, позволил сделать вывод об отсутствии печатных изданий в которых в достаточно обобщенном и концентрированном виде были бы освещены вопросы проектирования и технологии РЭС, что и послужило исходной предпосылкой для написания настоящего учебного пособия.

Учебное пособие предназначено для студентов радиотехнического факультета специальностей «Радиотехника» и «Проектирование и технология РЭС» и рекомендуется в качестве методического материала при изучении соответствующих дисциплин. Учебное пособие содержит комплекс знаний, позволяющий студентам овладеть теоретическими основами и получить на базе приведенного справочного и иллюстративного материала практические навыки разработки конструкций РЭС.

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС

### 1.1. Этапы развития конструкций РЭС

Проектирование радиоэлектронных средств (РЭС) можно разделить на три основных этапа: системотехнический, схемотехнический и конструкторско-технологический. Все этапы проектирования РЭС органически связаны и разработчик должен достаточно ясно представлять, как его, например, схемотехнические решения отразятся на конструктивных, технологических, экономических и эксплуатационных показателях РЭС, для чего он должен быть хорошо подготовленным во всех этих областях.

Проектирование РЭС началось одновременно с изобретением радио (А.С.Попов, 7 мая 1895 г.). Более того, само изобретение радиосвязи обязано разработке рациональной конструкции когерера (детектора). Общая конструкция аппаратуры беспроволочного телеграфа первые два десятилетия не отличалась от телеграфной аппаратуры тех лет (деревянный корпус, внутри которого на стенках размещались необходимые составные части).

Появление двухэлектродной лампы (1904 г., диод Д.Флеменга), а затем и трёхэлектродной (1906 г., Л.Форстер) привело к существенному увеличению коэффициента усиления каскадов радиоаппаратуры и возрастанию роли экранирования. Поэтому в конце 20-х годов вместо деревянного появилось металлическое основание (шасси), а в 30-х годах в связи с усложнением РЭС появляются стойки с размещёнными в них блоками, что реализовало идею расчленения РЭС и формирование ее иерархической структуры конструкции. Такой тип конструкции (шасси, радиолампы в качестве активных элементов) относится к первому поколению РЭС. Особое развитие аппаратура этого поколения получила с начала 40-х годов, когда её стали применять в самолётах, танках, автомобилях и кораблях, где использовались миниатюрные радиолампы и печатные платы.

Большие тепловыделения и массогабаритные характеристики, низкая надёжность РЭС положили начало внедрению в неё с 1948 г. нового типа активного элемента – транзистора, что вывело из тупика конструирование сложных РЭС и привело к появлению аппаратуры второго поколения.

Интенсивное развитие методов обработки сигналов привело к разработке и производству интегральных микросхем (ИМС), унифицированных функциональных узлов общего применения, не привязанных к конкретному устройству. РЭС на основе ИМС называют аппаратурой третьего поколения, основой конструкции которой окончательно утвердилась печатная плата. Повышение степени интеграции ИМС и растущие требования её коммутационных способностей привело к производству многослойных печатных плат (МПП).

Существенное улучшение массогабаритных характеристик с середины 70-х годов было реализовано с помощью появившихся в это время ИМС большой степени интеграции (до  $10^4$  элементов) в бескорпусном исполнении и микросборок (МСБ) – функциональных гибридных узлов с плёночными проводниками, резисторами и конденсаторами для конкретных конструкций с целью улучшения по-

казателей микроминиатюризации. Радиоаппаратуру, использующую бескорпусную элементную базу, ИМС высокой степени интеграции называют РЭС четвёртого поколения.

С середины 80-х годов начинается промышленное освоение ИМС со степенью интеграции элементов до  $10^5$ , волоконно-оптических кабелей наряду с электрическими проводниками, а также нового типа плат больших размеров (соизмеримых с типовыми ПП 170x75 мм) – металлических, покрытых изоляционным слоем из стеклоэмали с печатным рисунком, выполненным по технологии толстых плёнок и содержащем проводники и некоторые типы резисторов и конденсаторов. Металлические платы существенно улучшают теплоотвод от элементной базы, что является одной из основных проблем конструирования современных РЭС. После общей или локальной герметизации, необходимой для защиты бескорпусных ИМС, включающих активные и изготовленные по прецизионной тонкоплёночной технологии элементы конструкции РЭС переходят на новый структурный уровень – аппаратуру пятого поколения.

## 1.2. Классификация РЭС

Классификацию различных радиоэлектронных средств можно осуществить по её сходству в конструкторской реализации. Разделяя все РЭС на классы, можно получить максимум полезной информации при минимальном наборе легко определяемых классификационных признаков /1/.

По среде применения РЭС подразделяются на следующие классы: наземные, бортовые и морские. Эта классификация позволяет выбирать основные направления проектирования, оценивать влияние внешней среды, значимость тех или иных показателей качества РЭС.

Широкое распространение получило разделение РЭС по среде применения и объекту-носителю. В этом случае к уже указанным классам добавляется ещё один, представляющий самый массовый вид РЭС – бытовую радиоаппаратуру, а каждый из четырёх образованных классов подразделяется по объекту установки. Например, класс наземных РЭС включает возимую, носимую, переносимую и стационарную радиоаппаратуру.

Для проектирования РЭС чрезвычайно важна классификация по климатическому исполнению, определяющему выбор электрорадиоэлементов, материалов, защитных покрытий, необходимость герметизации и др. Атмосферные воздействия зависят не только от климата в месте расположения РЭС, но и от объекта установки (например, расположение РЭС в данной климатической зоне на открытом воздухе или отапливаемом помещении). Существует девять климатических зон (умеренный климат, в конструкторской документации обозначается литерой – У; тропический сухой или влажный, соответственно обозначается ТС или ТВ и др.) и пять категорий размещения РЭС на объекте (обозначаются цифрами от 1 до 5). Обозначение в документации на конструкцию как, например, УХЛ1 будет означать, что РЭС предназначены для работы в умеренной и холодной климатической зонах (УХЛ) с установкой на открытом воздухе (цифра 1) /1,2/.

В соответствии с ГОСТ 14007-68 РЭС классифицируются по условиям эксплуатации. Последние, в свою очередь, подразделяются на: лёгкие условия (эксплуатации),

плуатация без дополнительных защитных приспособлений в виде футляра или кожуха, т. е. в помещениях с кондиционированием воздуха), обозначение – литера Л; средние условия, т.е. непосредственное воздействие окружающей среды с влиянием повышенной морской влажности, механических нагрузок и различных излучений, безвредных для человека – литера С; соответственно по степени увеличения тяжести условий эксплуатации условия классифицируются как жёсткие – обозначение Ж; особо жёсткие – ОЖ.

В основу классификации по функциональному признаку положены основные особенности преобразования сигналов. При этом возможны существенные различия конструкций внутри классов (приёмники бытовой радиовещательный или радиолокационный).

При выяснении особенностей конструкций отдельных РЭС эффективной может быть классификация по определяющему параметру, причём чаще всего это рабочая частота или мощность, например, мощный радиопередатчик должен иметь крупногабаритные электрорадиоэлементы (ЭРЭ) и принудительное охлаждение.

Кроме отмеченных выше систем классификации РЭС, существует деление по категориям, учитывающим продолжительность работы: РЭС многократного, однократного, непрерывного и общего применения. Для аппаратуры, эксплуатируемой на высоте более 1000 м, предусматривается отдельная система классификации.

### **1.3. Проблемы проектирования РЭС**

Комплексная миниатюризация, обеспечивающая высокие плотности упаковки ИМС микросборок, малые коэффициенты дезинтеграции порождает ряд проблем, органически присущим устройствам с плотным размещением элементов /3/. К ним относятся проблемы теплоотвода, помехоустойчивости, количества контактов и др.

1. Проблема теплоотвода. Уменьшение объёмов РЭС приводит к уменьшению площади поверхности и возрастанию удельных тепловых потоков от микроЭлектронных устройств в окружающее пространство. Увеличение числа ЭРЭ в единице объёма РЭС приводит к повышению выделяемой удельной мощности. Всё это вызывает резкое возрастание тепловых нагрузок, повышение рабочей температуры и увеличение интенсивности отказов ЭРЭ РЭС.

Эта проблема может быть решена снижением потребляемой ИМС мощности (в первую очередь снижением напряжения питания ИМС), повышением предельной рабочей температуры ИМС, разработкой эффективных устройств теплоотвода, не снижая показателей микроминиатюризации и др.

2. Проблема помехоустойчивости РЭС. Повышение плотности электромонтажа в пределах полупроводниковых ИМС, микросборок и функциональных ячеек, применение многоуровневой разводки, снижение напряжения питания обуславливают наличие паразитных связей, наводок, возникновение внутренних помех при функционировании РЭС. Основными видами паразитных связей в РЭС являются паразитные и индуктивные связи, а также связь через общее активное и индуктивное сопротивление шин питания.

Искажения основных сигналов и уровень помех зависят от ряда факторов, определяемых, в частности, конструкцией электромонтажа: электрической длиной монтажных линий связи и неоднородностью их параметров, к которым в первую очередь относится волновое (характеристическое) сопротивление; величиной и характером взаимодействия электромонтажных линий; числом взаимодействующих линий; параметрами генераторов и приёмниками помех (амплитудой, длительностью, фазой, полярностью сигналов, входным, выходным сопротивлениями и ёмкостью схемы).

Для РЭС с повышенной плотностью упаковки ИМС и многоуровневой коммутации характерно наличие значительных ёмкостных связей между сигнальными проводниками, расположенными на различных уровнях коммутации. Уровень этих паразитных связей определяется толщиной изоляции, её диэлектрической проницаемости, числом пересечений проводников.

Для снижения уровня помех, обусловленных ёмкостной и индуктивной связями между коммутационными элементами РЭС, проводники следует располагать в соседних слоях во взаимно перпендикулярных направлениях, обеспечивать минимальную длину проводников. Значение паразитных ёмкостей уменьшается при использовании проводников малой ширины, что приводит к заметному увеличению их сопротивлений. Для снижения уровня помех, обусловленных индуктивностями шин питания и заземления, необходимо увеличивать их ширину и располагать шины друг под другом на соседних уровнях коммутации, использовать развязывающие фильтры и элементы согласования.

**3. Проблема количества контактов.** Одним из ограничивающих факторов, сдерживающих процесс роста функциональной сложности, является увеличение числа соединений между элементами РЭС (ИМС, МСБ), функциональными ячейками, блоками и т.д. Эти соединения, занимая большие площади и объёмы в РЭС, с одной стороны снижают показатели миниатюризации, а с другой, – являясь потенциальными и наиболее вероятными носителями отказов, снижают надёжность РЭС.

Решение этой проблемы частично основано на стремлении сосредоточить максимально возможное число связей в пределах ИМС, снижая тем самым число соединений между самими ИМС. Однако образующиеся при этом БИС и СБИС – узкоспециализированные устройства, что входит в противоречие с многообразием функций РЭС. В этом плане большими возможностями обладают устройства функциональной электроники.

**4. Проблема миниатюризации и компоновочной совместимости элементной базы.** Микроминиатюризация изделий интегральной электроники значительно опережает развитие и микроминиатюризацию пассивных дискретных ЭРЭ – резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, трансформаторов, разъёмных соединений и др., имеющих несовместимые с ИМС габариты, технологию монтажа и условия эксплуатации. При высоком уровне использования ИМС и малом количестве дискретных ЭРЭ (2–5%) объём, занимаемый последними, составляет 10–15% от объёма ячейки, а зона дополнительных устройств, обеспечивающих условия эксплуатации этих ЭРЭ – 15–30% от объёма блока. Проблема компоновочной совместимости элементной базы решается, как правило, мерами рационального

размещения крупногабаритных ЭРЭ на отдельных платах. Достаточно остра проблема миниатюризации разъёмных соединений, зачастую являющихся соизмеримыми с габаритными размерами блока. Принципиальные и существенные достижения миниатюризации разъёмов позволяют создать волоконно-оптические линии связи (ВОЛС).

5. Проблема снижения материоёмкости и массы конструкций РЭС. Существующая диспропорция между массой активных (ИМС, МСБ) и пассивных ЭРЭ и массой несущих конструкций (корпуса блока, ПП, крепежа) с увеличением степени интеграции ИМС и миниатюризации ЭРЭ возрастает. Доля последних в блоках на корпусированных ИМС составляет 15–30%, а в блоках на бескорпусных – единицы и даже доли процента. Существенный выигрыш в устраниении этой диспропорции даёт использование гибких печатных плат, шлейфов, носителей на полиамидной плёнке и ВОЛС.

Однако металлические детали конструкции выполняют функции, которые неметаллы выполнять не могут: отвод тепла, обеспечение герметичности, прочности, экранирования и др. Масса металлоконструкций в блоке даже при использовании алюминиевых сплавов составляет 35–50%. Перспективно использование магнитных сплавов, что снижает массу металлоконструкций в блоке на 15–30%; применение точного тонкостенного литья и паяного вакуумно-плотного вскрываемого шва, позволяющих снизить толщину стенок герметизирующего корпуса в 1.5–2 раза. Для снижения массы деталей корпуса при сохранении прочностных характеристик следует использовать такие технологические приёмы как отбортировку, выдавки, гофры, делать в деталях отверстия, выемки, проточки, не допускать больших запасов прочности отдельных деталей и узлов.

## 2. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС

### 2.1. Системный подход при проектировании РЭС

Требования, предъявляемые к РЭС, постоянно ужесточаются, а усложнение аппаратуры приводит к необходимости внедрения последних достижений науки и техники в разработку, конструирование и технологию РЭС. Основное требование при проектировании РЭС состоит в том, чтобы создаваемое устройство было эффективнее своего аналога. Аналогом называют реально существующую конструкцию отечественной или зарубежной разработки того же класса, обладающую сходностью назначения (ГОСТ 2.116–71). Могут быть аналоги в целом и по составным частям.

Эффективность проектируемого РЭС в общем виде можно оценить основной целевой функцией (1)

$$E=f(z_1, z_2, \dots, z_n)=f(Z), \quad (1)$$

где  $Z=\{z_i, i=1, 2, \dots, n\}; z_i \in Z$ .

Такая функция дает количественную оценку степени достижения поставленной цели и поэтому называется целевой функцией. Элементами  $z_i$  множества  $Z$  являются частные целевые функции, т.е. отдельные качественные и количественные показатели, определяющие пригодность применения РЭС в соответствии с назначением. Такими показателями для РЭС являются: масса, объем, энергопо-

требление, диапазон частот, быстродействие, чувствительность, коэффициент усиления, полоса пропускания, дальность действия, выходное напряжение, точность, электромагнитная совместимость, ударопрочность, влагостойкость, уровень унификации и миниатюризации, технологичность, безопасность, себестоимость, экономичность и т.д.

Целевая функция формируется в интересах оптимизации, т.е. наиболее рационального решения задачи проектирования РЭС и выбора компромисса между частными целевыми функциями  $z_i \in Z$ . Целевая функция может относиться как к техническим показателям (например, достижение максимальной мощности при минимальной массе), так и экономическим (получение максимального экономического эффекта при принятом числе типоразмеров).

Следует указать, что в задачах оптимизации показателей качества ответственным моментом является определение вида целевой функции и ее составляющих  $z_i$ , т.е. установление связи между оптимизируемыми и другими показателями качества и технико-экономическими характеристиками изделия. Для успешного определения целевой функции необходимо стремиться к минимальному числу оптимизируемых показателей, вводя комплексные интегральные или обобщенные показатели качества. Необходимо учитывать, что конструкция РЭС влияет практически на все показатели и имеет решающее значение, поскольку она должна обеспечивать устойчивое функционирование РЭС с необходимой точностью, надежностью и безопасностью при наличии воздействий со стороны объекта, окружающей среды, человека-оператора, взаимодействия элементов РЭС через электромагнитное поле.

В процессе проектирования и производства РЭС на начальном этапе этого сложного процесса конструируемое изделие можно рассматривать как систему, поддающуюся математической формализации. Эта система определяется как ограниченное множество элементов, объединенных некоторыми связями и образующих в то же время единое целое. Части элементов системы, выполняющие функционально завершенные преобразования, в свою очередь, образуют подсистему.

Система, как было отмечено выше, может быть formalизована, т.е. представлена математической моделью ее функционирования. В эту модель вводятся допуски и упрощения, т.е. конечная модель будет упрощена математическим отображением наиболее существенных свойств системы  $Y = A\{X\}$ .

В общем случае модель указывает, что некоторая совокупность выходных характеристик  $Y$  связана с определенной совокупностью входных характеристик  $X$  через оператор  $A$ . Принято различать детерминированные и вероятностные модели. И те, и другие могут быть статическими или динамическими. Исследование объектов с помощью их математических моделей представляет основную суть системного подхода, который характеризуется следующими важнейшими принципами:

1. Целостностью системы. Целое не может быть познано без знания части этого целого, однако само целое может не являться простой суммой свойств его составляющих.

2. Структурностью, т.е. возможностью дробления самой системы и единение с помощью связи между ее элементами.

3. Иерархичностью. Каждая подсистема или функционально замкнутый элемент системы могут рассматриваться тоже как система.

4. Множественностью описаний. Система может быть описана множеством математических моделей, каждая из которых характеризует одно из свойств системы.

5. Взаимозаменяемостью системы и среды. Конкретное свойство системы проявляется только во взаимодействии с окружающей средой.

Системный подход предполагает общую оптимизацию разработки в целом в процессе проектирования на этапе производства и эксплуатации изделия в РЭС. При этом отдельные составляющие части изделия могут не подвергаться оптимизации.

### *2.1.1. Реализация системного подхода в технологическом процессе производства РЭС*

Любой технологический процесс можно представить набором некоторых операций: изготовление деталей, сборки, регулировки, выходных испытаний. Все эти операции увязаны в единый технологический процесс и могут быть представлены в виде следующей схемы технологического процесса.

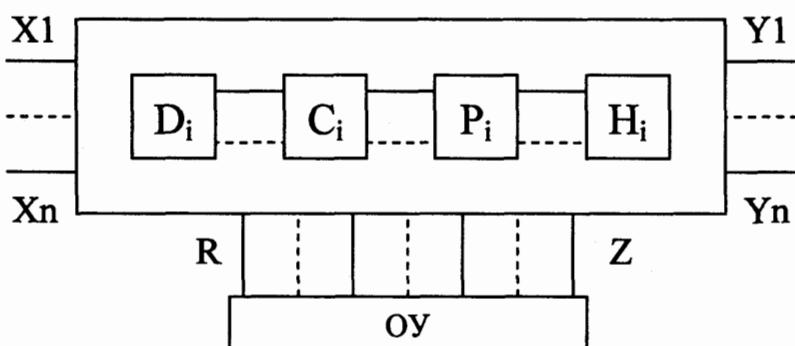


Рис. 1.

В функциональную схему включаются возмущающие воздействия  $X$ , выходные переменные  $Y$ , управляющие воздействия  $R$ , полученные из системы уравнений наблюдаемые характеристики  $Z$ .

Анализ позволяет реализовать системный подход в технологии, т.к. рассматриваются все этапы технологического процесса.

В качестве входных характеристик  $X$  данной схемы могут быть: комплектующие и их состав, материалы, технические средства, квалификация рабочих.

Выходные характеристики: точность, стоимость, надежность изготавляемой продукции.

Наиболее распространенным системным методом является тот, при котором технолог вводит некоторую обобщенную функцию  $E$ , зависящую от совокупности параметров  $H$

$$E = \Phi(H)$$

и определяет ее как целевую функцию при оптимизации технологического процесса. Такая функция должна соответствовать показателю, отвечающему за наиболее важные характеристики производственного процесса.

Если этапы производственного процесса детерминированы, то каждый из них представим некоторым вектором ( $X(t)$ ), тем самым подчеркивается многомерность каждого из параметров. Если величины случайные, то элементами этих векторов будут математические ожидания соответствующих величин.

Если предположить, что состояния системы в целом в начальный момент определены ( $t_0$ ), то текущее состояние системы ( $t_i$ ) будет функцией состояния, причем  $Y(t_i)$ ,  $R(t_i)$ ,  $X(t_i)$ ,  $E$ ,  $A(t)$ ,  $B(t)$ ,  $C(t)$  принимают возможные физические состояния системы в целом, т.е. определяют граничные условия, для которых целевая функция запишется как

$$E = CP[Y(t_i), X(t_i), R(t_i)].$$

Экстремальные значения этой функции соответствуют оптимальному технологическому процессу. В управлении технологическим процессом могут участвовать любые из параметров. Реально рассматривается тот, который оказывает наибольшее влияние на ход технологических процессов.

Оптимизация проводится в несколько этапов: отыскиваются идеальные значения одного из векторов, затем подбираются реально возможные параметры этого вектора. Окончательная оптимизация завершается в процессе производства при наладке и корректировке.

### 2.1.2. Реализация системного подхода при конструировании РЭС

Процесс конструирования может быть отражен набором операций, определяющихся принципом действия конструкции и функциональной схемой этой конструкции, с подготовкой набора рабочей документации и анализом качества сделанной разработки. Все эти наборы операций увязываются обобщенную функциональную схему процесса конструирования, реализующую системный подход.

Включение математической модели в схему процесса конструирования позволяет решать оптимизационные задачи, направленные на совершенствование данного процесса. По аналогии с предыдущей схемой есть возмущающие воздействия входных параметров управляющих и наблюдаемых.

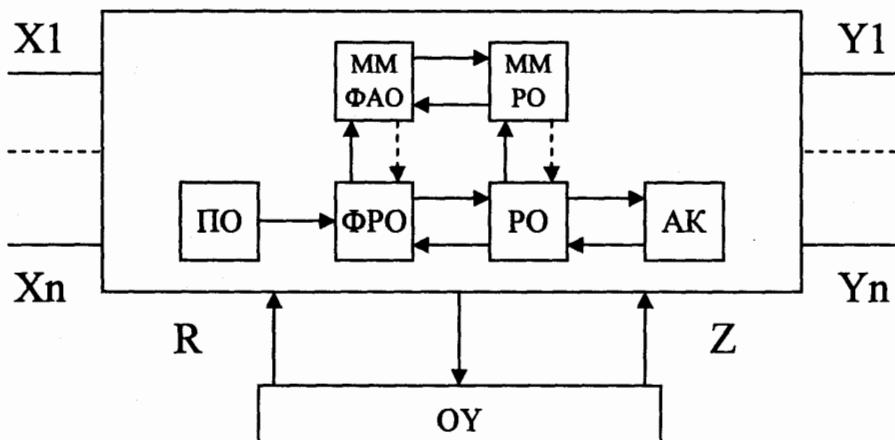


Рис. 2.

Возможные процессы оптимизации показаны двумя направленными линиями. Структурная схема позволяет подчеркнуть, что сущность системного подхода – исследование объекта конструирования с помощью математической модели, позволяющей уменьшить число ошибок и снизить стоимость разработки.

## 2.2. Основные этапы научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР)

### 2.2.1. Основные этапы разработки РЭС

Процесс конструирования РЭС неоднороден и включает несколько различных этапов как эвристического, так и алгоритмического характера, приведенных в таблице 1.

Таблица 1

1. Анализ задания	Эвристический характер
2. Поиск основополагающей идеи	
3. Эскизирование	Эвристический и
4. Проверочные расчеты	алгоритмический характер
5. Разработка и вычерчивание общего вида	
6. Деталировка. Составление спецификации и проверка	Алгоритмический характер

### 2.2.2. Основные этапы НИОКР

Основные этапы НИОКР могут рассматриваться вместе с процессом жизни конкретного РЭУ, от момента зарождения идеи до момента снятия изделия с производства.

Все эти этапы можно представить в виде таблицы 2.

**Методы проектирования.** Возможны различные подходы к классификации методов проектирования РЭС. Например, можно выделить в зависимости от вида связи между элементами (1), в зависимости от способа выявления и организации структуры связи между элементами (2), в зависимости от автоматизации выявления структуры связи между элементами (3), три группы методов, регулирующих различные подходы к проектированию.

Если в основе подхода к выбору конструкции рассматривается кинематика и геометрические связи деталей, принято говорить о геометрическом методе моделирования.

Если в основе не лежат жесткие связи, однако оговариваются характеристики веса жесткости, это указывает на машиностроительный метод моделирования.

Сравнивая эти методы, можно отметить большую пригодность последнего для последующей организации серийного производства изделия.

Помимо выше отмеченного подхода, возможна и следующая классификация методов проектирования:

1. эвристические методы
2. математические методы
3. экспериментальные методы.

Таблица 2

Научно-исследовательская работа	Составление заявки на разработку, выработка исходных технических требований и разработка ТЗ
Проектная стадия	Разработка технического предложения и эскизного проекта, разработка технического проекта
Разработка конструкторской документации опытного образца	Изготовление, предварительное испытание опытного образца и доработка конструкторской документации с присвоением литеры 01
Разработка конструкторской документации опытной серии	Подготовка производства и запуск в производство опытной серии, а также выполнение конструкторской документации с литературой А. Ведение конструкторской документации для сопровождения серийного производства
Эксплуатация	Обеспечение нормального режима эксплуатации ЗИП (запасные части и приборы), эксплуатационное сопровождение и обслуживание, снятие с производства, списание действующего парка

При этом математические методы связаны с анализом конструкции конкретного множества элементов, объединение которых в общую конструкцию производится с использованием оптимизационных математических подходов. Математические методы используются при автоматическом моделировании.

Составной частью САПР является математическое моделирование, позволяющее вместе с прикладными пакетами САПР обеспечить синтез структуры и определить оптимальные параметры проектирования системы. В идеале итогом работы САПР должна явиться техническая документация.

Для выбора и обоснования математического описания, для решения ряда дополнительных задач проектирования требуется эвристическая деятельность коллектива разработчиков, неподдающегося прямому математическому описанию.

При применении математических методов совокупность исходных данных формализуется и готовится математическое описание предполагаемой конструкции. При этом описывают условия функционирования системы.

Вводят ограничения на работу и определяют показатели изделия критерием качества РЭС.

Определение целевых функций, т.е. зависимости частных показателей качества от структуры системы и значение ее параметров при заданных условиях. Та-

ким образом, появляется функциональная зависимость от тех или иных проектов решения.

Математические методы активно используют как аналоговую, так и цифровую вычислительную технику. Формализованное описание показателя качества РЭС представляет собой модель системы. Результатом проектирования на ЭВМ являются конкретные конструкторские решения, появляется возможность реализации синтеза будущей РЭС.

Математическое моделирование является основной частью САПР, задачей которых являются задачи синтеза и определение оптимальных значений параметров систем. В идеале итогом работы САПР является готовая техническая документация.

Помимо эвристической деятельности элементом проектирования являются экспериментальные исследования, которые включают следующие основные виды работ:

1. Полунатурное моделирование (часть звеньев системы заменяются натуральными макетами).
2. Лабораторные исследования (смоделированы условия натурального канала связи).
3. Полевые испытания (условия, приближенные к реальным).
4. Испытания в эксплуатации.

Эвристические методы реализуются при решении следующих задач:

1. Выбор цели проектирования.
2. Определение физических принципов действия системы.
3. Обоснование математической модели системы.
4. Выбор методов исследования.
5. Выбор элементной базы.
6. Трактовка результатов исследования.

Эвристическая деятельность опирается на опыт разработки подобных систем.

Экспертная система – попытка ввести уже имеющийся опыт для оценки проектируемого изделия. Экспертный метод основан на количественной сравнительной оценке показателей качества посредством установления мнения группы высококвалифицированных специалистов (обычно семи). Показатели для оценки аналога и данной конструкции необходимо устанавливать с помощью одной и той же экспертной группы в один и тот же день или с очень малым разрывом во времени.

### **2.3. Конструкторская документация**

Требования, предъявляемые к конструкторской документации, изложены в Единой системе конструкторской документации (ЕСКД), где определены: основные положения по порядку разработки и формы конструкторских документов; правила выполнения и оформления чертежей и схем; графические и буквенные условные обозначения; обозначения конструкторских документов; учет, хранение, обращение и изменение документов. /4/

Единая система конструкторской документации обеспечивает: возможность взаимообмена документами без их переоформления между различными предприятиями внутри страны; сокращение типов и упрощение форм документов, снижающие трудоемкость проектирования.

Конструкторской документацией называют графические или текстовые документы, которые в отдельности или вместе с другими документами дают необходимое представление о составе и устройстве изделий и их составных частей и содержат необходимые данные для их разработки и изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта.

В графических документах с помощью установленных стандартом символов и правил поясняются устройство, принцип действия, состав и связи между отдельными частями изделия. К графическим документам относятся (в скобках указан шифр документа):

- чертеж детали, на котором представлено ее изображение и данные, необходимые для изготовления и контроля;
- сборочный чертеж (СБ), содержащий изображение изделия и данные, требующиеся для его сборки и контроля;
- чертеж общего вида (ВО), изображающий конструкцию изделия и дающий представление о его составе, взаимодействий основных частей и принципе работы;
- теоретический чертеж (ТЧ), представляющий геометрическую форму изделия и координаты его основных частей;
- габаритный чертеж (ГЧ), изображающий в упрощенном виде изделие с габаритными, установочными и присоединительными размерами;
- монтажный чертеж (МЧ), содержащий упрощенное изображение изделия и данные для его монтажа;
- схемы электрические: структурная (Э1), функциональная (Э2), принципиальная (Э3), соединений (Э4), подключений (Э5), общая (Э6), расположения (Э7). Схемы соединений указывают на соединения частей изделия и изображают провода, жгуты, кабели и другие соединительные изделия, места их присоединения и ввода. Схемы подключения показывают внешнее подключение изделия, а общие схемы – составные части комплекса и соединение их между собой на месте эксплуатации. Схемы расположения определяют взаимное расположение составных частей комплекса, соединяющих их жгутов, проводов кабелей. Эти схемы используют главным образом при монтаже, накладке, ремонте и эксплуатации изделия;
- спецификация (СП), определяющая состав единицы, комплекса и комплекта.

Текстовые документы содержат описания: устройства, принципа действия и эксплуатационных показателей изделия, состава конструкторской документации. К текстовым документам относятся:

- ведомости: спецификаций (ВС), ссылочных документов (ВД), согласования применения изделий (ВИ), покупных изделий (ВП), держателей подлинников (ДП), технического предложения (ПТ), эскизного (ЭП) и технического (ТП) проектов. Ведомости содержат перечни спецификаций, ссылочных документов и т.д.;

пояснительная записка (ПЗ), описывающая устройство, принцип действия изделия и включающая в себя обоснование принятых при его разработке технико-экономических решений;

– технические условия (ТУ), задающие все требования к изделию, его изготовлению, комплектации, приемке, поставке и эксплуатации. Техническое условие должно содержать введение и такие разделы, как технические требования, правила приемки (объем периодичность), методы контроля (испытаний, анализа, измерений), включая описание соответствующих операций и аппаратуры, необходимых для подтверждения технических и тактико-технических характеристик изделия, условия транспортировки и хранения, указания по эксплуатации, гарантии поставок;

– программа и методика испытаний (ПМ), содержащая проверяемые технические характеристики изделия, порядок и методы их контроля;

– расчеты (РР) параметров и величин;

– патентный формуляр (ПФ), отражающий оценку патентоспособности, патентной чистоты и технического уровня изделий, материалов, технологических процессов, методов измерений и испытаний.

По способу выполнения и характеру использования конструкторские документы делят на: оригиналы, предназначенные для изготовления подлинников; подлинники, скрепленные подлинными подписями и позволяющие воспроизведение копий; дубликаты; копии – идентичные с подлинником (дубликатом) и предназначенные для непосредственного использования при разработке, изготовлении и эксплуатации изделий.

#### **2.4. Этапы процесса проектирования**

Этапы разработки конструкторской документации следующие: техническое задание – техническое предложение – эскизный проект – технический проект – разработка рабочей документации.

*Техническое задание.* Требования к техническому заданию (ТЗ) устанавливает ГОСТ 15.001–73. Техническое задание – это документ, в котором указывается: основное назначение, технические и тактико-технические характеристики, показатели качества, в том числе надежности, технико-экономические требования, необходимые стадии разработки конструкторской документации и ее состав, состав РЭС или системы.

В общих технических требованиях задаются условия эксплуатации, хранения и транспортировки, в частных – основные структурные, программные и другие технические характеристики (форма и точность представления информации, скорость ее преобразования, объем и быстродействие запоминающих устройств, максимальная потребляемая мощность и т.п.). В конструктивных требованиях указываются масса, габариты, требования к элементной базе, модульности и технологичности конструкции, к типоразмерам, уровню унификации, эргономике и технической эстетике, технике безопасности и т.д.

На основе общего технического задания могут составляться ТЗ на отдельные устройства, в которых уточняются соответствующие характеристики.

*Техническое предложение.* Совокупность конструкторских документов, содержащих технические и технико-экономические обоснования целесообразности разработки документации изделия, является техническим предложением. Обоснование делается по результатам анализа ТЗ и вариантов возможных решений, сравнительной оценки этих решений с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей разрабатываемого и существующих изделий, а также патентных материалов. Техническое предложение разрабатывается по ГОСТ 2.118–73, если это предусмотрено ТЗ, при этом могут определяться дополнительные или уточненные требования к изделию на основе необходимой конструкторской проработки вариантов изделия.

*Эскизный проект.* Комплекс конструкторских документов, содержащий принципиальные конструктивные решения и дающий общее представление об устройстве и принципе работы изделия, составляет эскизный проект. Основание для разработки эскизного проекта – ТЗ или протокол рассмотрения технического предложения. Требования к эскильному проекту устанавливает ГОСТ 2.119–73.

*Технический проект.* Совокупность конструкторских документов, содержащих окончательные технические решения, представляет собой технический проект. Объем работ на стадии технического проектирования определяет ГОСТ 2.120–73. Технический проект разрабатывают, если это предусмотрено предшествующими стадиями. После завершения каждой стадии разработки составляется перечень работ, которые необходимо выполнить на следующем этапе.

При разработке технического предложения и эскизного проекта подготавливают варианты изделия, которые сравнивают по показателям качества, и выбирают оптимальный. На стадии эскизного проектирования принимают принципиальные конструктивные и схемные решения изделия, определяют не установленные ранее технико-экономические показатели, выявляют новые изделия и материалы, которые должны быть разработаны другими предприятиями, прорабатывают вопросы технологии изготовления. На этапе технического проектирования определяют конструкцию изделия и его составных частей, выполняют все необходимые расчеты, подтверждающие показатели, установленные ТЗ; разрабатывают принципиальные схемы, технические решения, обеспечивающие требуемые показатели надежности; анализируют конструкцию на технологичность с учетом условий конкретного предприятия–изготовителя.

На всех стадиях разработки изделие проверяют на патентную чистоту и конкурентоспособность, оценивают его соответствие требованиям эргономики, технической эстетики, техники безопасности и производственной санитарии, оформляются заявки на изобретения. На каждой стадии возможно изготовление макетов, если это необходимо для сравнительной оценки, проверки принципов работы изделий, а также принятых конструктивных и схемных решений.

После выполнения каждого из рассмотренных этапов копии документов комплектуют по ГОСТ 2.106–68 в техническое предложение, эскизный или технический проект и представляют заказчику на рассмотрение, согласование и утверждение (документам присваивают соответственно литеры «П», «Э» и «Т»). В комплект включают документы в соответствии с ГОСТ 2.102–68, предусмотренные предшествующими стадиями разработки.

*Разработка рабочей документации.* Рабочую документацию разрабатывают по ГОСТ 2.103–68 для изготовления и испытания опытного образца (опытной партии), установочных серий и установившегося серийного или массового производства. По результатам изготовления и заводских испытаний опытного образца корректируют конструкторские документы, им присваивают литеру «О». После проведения государственных, межведомственных, приемочных и других испытаний конструкторские документы можно вновь корректировать с присвоением им литеры «О<sub>1</sub>», при последующих изготавлениях и испытаниях – соответственно литер «О<sub>2</sub>», «О<sub>3</sub>» и т.д.

По рабочей документации установочных серий изготавливают и испытывают установочную серию. Конструкторские документы корректируют по результатам изготовления, испытания и оснащения технологического процесса ведущих составных частей изделия, им присваивают литеру «А».

По рабочей документации установившегося серийного или массового производства изготавливают и испытывают головную (контрольную) серию, после чего можно корректировать конструкторские документы. После окончательной отработки и проверки в производстве изделий по зафиксированному и полностью оснащенному технологическому процессу конструкторским документам присваивают литеру «Б».

Необходимость составления того или иного документа на различных этапах процесса проектирования показана в таблице 3.

При разработке конструкции элементов, узлов и устройств можно выделить две основные самостоятельные задачи: проектирование сборочных единиц как средств механического и электрического объединения входящих в них деталей и схемно-топологическое конструирование. Задачи схемно-топологического конструирования – определение схемного содержания конструктивных узлов, размещение их в монтажном пространстве, разработка связей между ними – решаются после разработки функциональных схем. Однако использование в современных ЭВМ однотипных и унифицированных элементов (типовых конструкций) позволяет совмещать проектирование функциональных и принципиальных схем с разработкой конструкции. Например, разработку конструкции блока или рамы можно выполнять одновременно с разработкой электрических функциональных и принципиальных схем. На рисунке 3 это отражено распараллеливанием процесса проектирования. Решения задач схемно-топологического конструирования могут вносить корректиды в функциональные и принципиальные схемы, что на схеме проиллюстрировано обратной связью.

Технологичность конструкции в значительной степени определяется принятыми разработчиками решениями. Конструктор должен хорошо разбираться в вопросах производства ЭВМ и участвовать в разработке технологии изготовления всех устройств, составляющих машину. Конструкции ЭВМ разрабатывают с учетом требований схемотехники, технологии, монтажа и наладки. Это позволяет учитывать схемотехнические требования, получать конструкцию с высокими технологическими характеристиками и рациональным монтажом, обеспечить удобство наладки и эксплуатации.

Таблица 3

Конструкторские документы, разрабатываемые на различных этапах процесса проектирования

Конструкторские документы	Этапы процесса проектирования						
	техническое предложение	эскизный проект	технический проект	детали	сборочные единицы	комплексы	комплекты
Чертеж детали	—	—	+	⊕	—	—	—
Сборочный чертеж	—	—	—	—	⊕	—	—
Чертеж общего вида	+	+	⊕	—	—	—	—
Теоретический чертеж	—	+	+	+	+	+	—
Габаритный чертеж	+	+	+	+	+	+	—
Монтажный чертеж	—	—	—	—	+	+	—
Схемы электрические	+	+	+	—	+	+	+
Спецификация	—	—	—	—	⊕	⊕	⊕
Ведомость спецификаций	—	—	—	—	+	+	+
Ведомость ссылочных документов	—	—	—	—	+	+	+
Ведомость согласования применения изделий	—	+	+	—	+	+	+
Ведомость держателей подлинников	—	+	+	—	+	+	+
Ведомость технического предложения	⊕	—	—	—	—	—	—
Ведомость эскизного проекта	—	⊕	—	—	—	—	—
Ведомость технического проекта	—	—	⊕	—	—	—	—
Пояснительная записка	⊕	⊕	⊕	—	—	—	—
Технические условия	—	—	—	+	+	+	+
Программа и методика испытаний	—	+	+	+	+	+	+
Расчеты	+	+	+	+	+	+	+
Патентный формуляр	+	+	+	+	+	+	—

Примечание. Знак "⊕" обозначает, что документ обязательный, "+" – документ составляется по усмотрению заказчика, "—" – документ не составляется.



Рис 3. Распараллеливание разработки типовой конструкции

### 3. ТЕПЛООБМЕН В РЭС

#### 3.1. Физические процессы, влияющие на функционирование РЭС, их особенности и взаимосвязь

Тепловой режим характеризуется совокупностью температур всех элементов, из которых состоит РЭС, т.е. его температурным полем (рис. 4). Основными тенденциями эволюции современных РЭС в микроэлектронном исполнении являются увеличение их сложности и снижение габаритов, с одной стороны, и увеличение требований к стабильности параметров – с другой. Эти тенденции противоречивы, так как увеличение сложности и уменьшение габаритов приводят к увеличению напряженности теплового режима, а требование обеспечения стабильности параметров системы связано с необходимостью его облегчения.

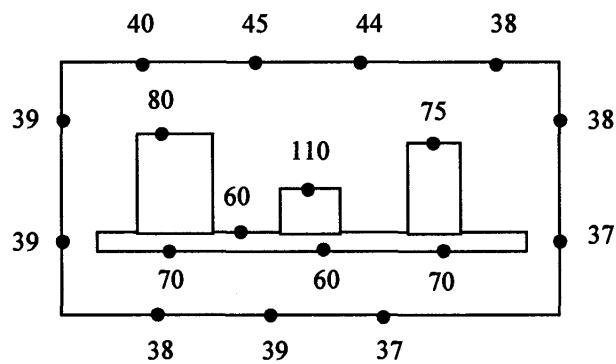


Рис. 4. Температурное поле РЭС  
(цифрами указана температура в градусах Цельсия).

Температурные воздействия снижают надежность и являются одним из важнейших дестабилизирующих факторов. Характерными дефектами, вызванными тепловыми воздействиями, являются ухудшение изоляционных свойств материалов, изменения параметров  $p-n$  перехода полупроводниковых приборов, значений емкости и сопротивлений ЭРЭ, снижение механических свойств полимерных материалов и др. Затвердение резины при низких температурах ухудшает качество амортизаторов и уплотняющих деталей. В конструкциях с различными коэффициентами линейного расширения возникают напряжения, которые приводят к деформациям конструкций, вызывая обрывы проводников и электрических соединений, заклинивания механических приводов, или, наоборот, ослаблению соединений.

Обеспечение необходимых условий работы заключается в создании уставновившегося режима, когда количество рассеиваемого тепла в окружающую среду равно выделенному количеству.

Увеличение напряженности теплового режима характеризуется плотностью теплового потока, который в конце 60-х годов составлял  $0.1...0.3 \text{ Вт}/\text{см}^2$ , в 70-е годы –  $0.5...1.0 \text{ Вт}/\text{см}^2$ , а в перспективе к 2000 г. ожидается, что он составит  $8...10 \text{ Вт}/\text{см}^2$ . Эффективность и качество конструкций РЭС в значительной степени за-

висят от их способности отводить теплоту. Так, удельная мощность на единицу объема и массы составляет для источников вторичного электропитания на дискретных элементах и печатных платах  $20\ldots30 \text{ Вт/дм}^2$  и  $25\ldots30 \text{ Вт/кг}$  соответственно, на микросборках в металлическом корпусе –  $100\ldots150 \text{ Вт/дм}^2$  и  $60\ldots80 \text{ Вт/кг}$  и на основе металлических подложек, охлаждаемых жидкостью, –  $200\ldots300 \text{ Вт/дм}^2$  и  $180\ldots300 \text{ Вт/кг}$ . Эти данные приведены без учета параметров системы охлаждения, масса, габариты потребляемая мощность, стоимость, надежность которых могут быть соизмеримы с параметрами охлаждаемого источника питания.

В процессе производства, хранения и эксплуатации РЭС может подвергаться воздействию положительных и отрицательных температур, обусловленных влиянием окружающей среды, объекта установки и тепловыделения самого РЭС. В наземных условиях температура окружающей среды может меняться от  $-88^\circ\text{C}$  (станция Мирный в Антарктиде) до  $+90^\circ\text{C}$  (нагрев темных поверхностей в странах с жарким и сухим климатом). Диапазон изменения температуры в атмосфере на высотах до 80 км (рис. 5) может достигать  $\pm 100^\circ\text{C}$ . Для космоса этот диапазон еще шире: от  $-150$  до  $+300^\circ\text{C}$ , что является результатом прямого и отраженного от Земли излучения Солнца, собственного излучения Земли, космического излучения, экранирования от излучения планет и частей объекта установки РЭС.

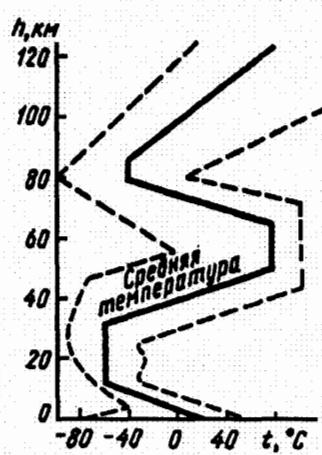


Рис. 5. Изменение температуры атмосферного воздуха в зависимости от высоты

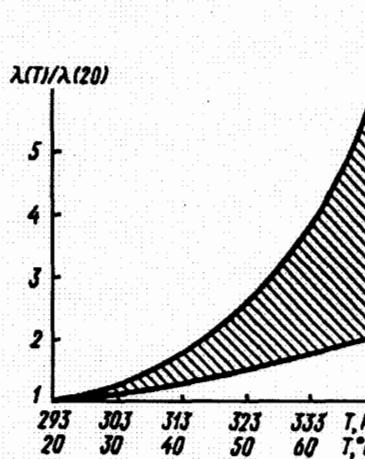


Рис. 6. Изменение интенсивности отказов  $\lambda$  с температурой для РЭС с воздушным охлаждением  
(заштрихована зона разброса параметров)

Диапазоны изменения температуры внутри объектов, где установлены РЭС, достигают в отапливаемых помещениях  $+5\ldots+50^\circ\text{C}$ ; на наземных подвижных объектах  $-60\ldots+60^\circ\text{C}$ ; на самолетах  $-70\ldots+150^\circ\text{C}$  и т.д. Кроме того, на объекте установки аппаратуры могут быть локальные источники тепла (двигатели) и холода (баки с охлажденным горючим, резервуары с охладителем для повышения чувствительности фотоприемников). Само РЭС является, как правило, источником теплоты вследствие того, что его КПД менее 100%. КПД приемника на электроваку-

умных лампах составляет менее 1%, модулей активной фазированной антенной решетки – около 1...1.5%, транзисторного усилителя – 50–60%, т.е. значительное количество подведенной к аппаратуре энергии выделяется в виде теплоты.

### 3.2. Законы теплопроводности, конвекции и излучения, определяющие теплообмен в РЭС

Рассмотрим известные методы моделирования и расчета тепловых характеристик узлов и блоков РЭС /5/. Предполагая, что материал конструктивных узлов однороден и, следовательно, тепловая проводимость не зависит от температуры, можно считать процесс теплопередачи линейным. Полное исследование температурного поля из-за множественности путей распространения тепла затруднено. Среди путей подвода или отвода тепла можно выделить теплопроводность, конвекцию, излучение. Рассмотрим сначала задачи теплопроводности (кондукции). Распространение тепловой энергии путем теплопроводности рассматривается в случае непосредственного контакта исследуемого поля и твердотельного источника тепла. Если температура источника постоянна, то контактирующее с ним тепловое поле можно представить набором эквипотенциальных поверхностей. Кондукция, как известно, осуществляется в соответствии с законом Фурье

$$q = -\lambda \mathbf{grad}T = -\lambda n_0 \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (2)$$

где  $q$  – плотность теплового потока;  $\partial T/\partial n$  – производная температуры по направлению нормали;  $n_0$  – единичный вектор по нормали в сторону возрастания температуры;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Если за время  $\tau$  через изотермическую поверхность конструкции площадью  $S$  выделяется тепловой поток  $Q = T_2 - T_1$ , то плотность теплового потока

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_T S}, \quad R_T = \frac{x_2 - x_1}{\lambda S}, \quad (3)$$

где  $R_T$  – тепловое сопротивление конструкции;  $x_1, x_2$  – координаты изотермических поверхностей температурного поля в направлении его изменения (в данном случае по оси  $T$ );  $T_1 > T_2$  – значение температур на этих поверхностях.

Известно, что в общем виде тепловое сопротивление конструкции

$$R_T = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{\lambda S(x)}, \quad (4)$$

где  $dx$  – элемент длины пути теплового потока;  $S(x)$  – аналитическое описание изотермической поверхности.

Следующее выражение аналогично выражению для электрического сопротивления материала конструкции:

$$R_T = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{\sigma S(x)}, \quad (5)$$

где  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость.

Другим способом теплопередачи от нагретых электрорадиоэлементов (ЭРЭ) соседним, к корпусу РЭС, от корпуса в окружающее пространство является конвекция. Этим путем происходит передача тепла, если нагретое тело контактирует с газом или жидкостью.

Различают свободную и искусственную конвекцию. Свободная конвекция имеет место при нагреве газа или жидкости за счет естественного перемещения вверх более теплых частиц. Искусственная конвекция происходит за счет интенсивного перемешивания теплонесущей среды механическим путем и протекает в ламинарном, переходном или турбулентном режиме.

Теплоотвод конвекцией определяется законом Ньютона

$$P_k = \alpha_k S \Delta T, \quad (6)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент теплопередачи конвекцией;  $S$  – площадь поверхности теплоотдачи;  $\Delta T$  – перегрев поверхностей относительно друг друга.

Определение коэффициента теплопередачи конвекцией является сложной задачей. Наиболее удобно это сделать с помощью критериальных уравнений, полученных из теории подобия и связывающих температуру среды, коэффициента объемного расширения и других факторов.

Коэффициент теплопередачи тогда будет определяться уравнением

$$\alpha_k = \lambda Nu / l_0, \quad (7)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности среды;  $l_0$  – параметр, определяющий размер тела, обтекаемого потоком охладителя;  $Nu$  – критерий Нуссельта, характеризующий процесс теплообмена в пограничном слое между твердым телом и средой (газом или жидкостью).

Критерий Нуссельта определяется формулой

$$Nu = m(Gr Pr)^n, \quad (8)$$

где  $m$  и  $n$  – эмпирические коэффициенты;  $Gr$  – критерий Грасгофа, дающий соотношения между подъемной силой и силой вязкости среды;  $Pr$  – критерий Прандтля, характеризующий теплофизические свойства вещества.

Коэффициенты  $m$  и  $n$  зависят от режима теплоотвода (ламинарный, переходный и турбулентный), а  $Gr$  и  $Pr$  – от коэффициентов объемного расширения и кинематической вязкости среды, теплоемкости, плотности среды и других факторов. Более подробно порядок расчета конвекционного теплообмена и значения коэффициентов и констант приведены в /6/.

Теплообмен излучением /7/. Тепловая энергия излучается электромагнитными волнами в инфракрасном диапазоне длин. По закону Стефана–Больцмана, излучаемая в пространство энергия

$$\Phi = \varepsilon C_0 S (\theta / 100)^4, \quad (9)$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты тела  $0 < \varepsilon < 1$ ;  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $S$  – площадь излучающей поверхности тела;  $\theta$  – температура тела.

Тепловая энергия (Вт), передаваемая излучением от поверхности тела  $i$  с температурой  $\theta_i$  и площадью  $S_i$  к поверхности тела  $j$  с температурой  $\theta_j$  и площадью  $S_j$ , на основании того же закона:

$$\Phi_{i,j} = \varepsilon_{np_{i,j}} C_0 \varphi_{i,j} S_i [(\theta_i / 100)^4 - (\theta_j / 100)^4], \quad (10)$$

где  $\varepsilon_{np_{i,j}}$  – приведенная степень черноты тел  $i$  и  $j$ ;  $\varphi_{i,j}$  – коэффициент облученности, показывающий, какая часть тепловой энергии, излучаемой телом  $i$ , попадает на тело  $j$ ,  $\theta_i$  и  $\theta_j$  – абсолютная температура тел  $i$  и  $j$ .

Зависимость (10) можно представить в виде

$$\Phi_{i,j} = \alpha_{\lambda_{i,j}} (\theta_i - \theta_j) S_i. \quad (11)$$

Коэффициент теплообмена излучением между телами  $i$  и  $j$

$$\alpha_{\lambda_{i,j}} = \varepsilon_{np_{i,j}} \varphi_{i,j} \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (\theta_i^4 - \theta_j^4) / (\theta_i - \theta_j). \quad (12)$$

Коэффициент  $\varepsilon$  зависит от материала излучающего тела и состояния его поверхности.

Следует отметить, что в конструкциях РЭС высших структурных уровней (например, блоков) при нормальных климатических условиях и естественном охлаждении около 70% тепла отводится за счет конвекции, приблизительно 20% – за счет излучения и 10% за счет теплопроводности.

### 3.3. Сложный теплообмен и построение тепловых моделей конструкций РЭС

Для анализа сложных условий теплообмена и построения тепловых моделей типовых конструкций используются принципы суперпозиции температурных полей и принцип местного влияния, позволяющие упростить математические описания процесса и последующие вычисления.

*Принцип суперпозиции температурных полей.* Конструкция РЭС представляет собой систему многих тел, являющихся источниками или стоками тепловой энергии. Возникает задача определения температуры каждого тела (элемента конструкции), находящегося во взаимном тепловом обмене с другими телами и окружающей средой. Система тел, находящихся во взаимном теплообмене, схематично показана на рис. 7. Перегрев изотермической поверхности  $j$  тепловым потоком, передаваемым от изотермической поверхности  $i$ , определяется как:

$$\Delta\theta_{j,i} = \theta_i - \theta_j = F_{j,i} \Phi_i.$$

Если мощности источников и стоков тепловой энергии и тепловые коэффициенты не зависят от температуры, то в соответствии с принципом суперпозиции суммарный наведенный нагрев тела  $j$  из-за теплообмена с остальными телами находят как алгебраическую сумму каждого перегрева:

$$\Delta\theta_{ij} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n F_{i,j} \Phi_i - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^m F_{k,j} \Phi_k, \quad (13)$$

где  $n$  и  $m$  – число элементов конструкции, являющихся источниками и стоками тепловой энергии для тела  $j$ .

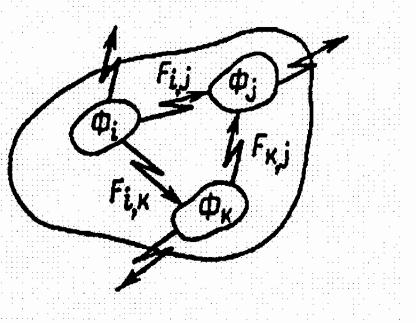


Рис. 7. Система тел, находящихся во взаимном теплообмене.

Учитывая температуру окружающей среды  $\theta_c$  и собственный перегрев тела, получим окончательное выражение для определения температуры

$$\Delta\theta_{j,j} = \Phi_j F_{j,j}, \quad (14)$$

$$\theta_j = \theta_c + \sum_{i=1}^n F_{i,j} \Phi_i - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^m F_{k,j} \Phi_k, \quad (15)$$

Принцип суперпозиции температурных полей можно применять и тогда, когда тепловые коэффициенты зависят от температуры. В этом случае тепловые коэффициенты  $F_{ij}$  или тепловые сопротивления  $R_{ij}$  необходимо определять при данной температуре, т.е. выражение (15) можно использовать при расчетах, например по методу последовательных приближений.

*Принцип местного влияния.* Этот принцип позволяет в ряде случаев значительно упростить задачу анализа пространственного распределения температурного поля. В работе /6/ этот принцип сформулирован следующим образом: любое местное возмущение температурного поля является локальным и не распространяется на удаленные участки поля.

Источники тепловой энергии в общем случае неравномерно распределены в объеме конструкции ЭВМ. Они могут иметь различные геометрические размеры или состоять из материалов, теплофизические свойства которых существенно различны. Если выделяемая источниками тепловая энергия одинакова, то на основании принципа местного влияния можно утверждать, что на некотором удалении от них каждый наводит одинаковый перегрев. На границе элемента или нескольких элементов из разных материалов может резко изменяться температурный градиент, но на некотором расстоянии от границ неоднородности практически не влияют на температурное поле. Расстояние, на котором конфигурация тела не влияет на характер температурного поля, равно наибольшему размеру этого тела.

На основании принципа местного влияния можно утверждать, что наведенный перегрев в некоторой точке конструкции практически не зависит от размеров и конфигурации источников и стоков тепловой энергии, если они удалены от этой точки на соответствующее расстояние. Вблизи от элементов температурное поле зависит от их формы, размеров и характера распределения в них тепловой энергии.

### 3.4. Общие методы расчета температурных режимов работающих РЭС

В практике конструирования для расчетов тепловых режимов часто используют приближенные коэффициентные методы расчета, позволяющие быстро и с приемлемой погрешностью (порядка 25–30 %) определить среднеповерхностный перегрев нагретой зоны РЭС /8/.

Сущность этого метода состоит в том, что искомую температуру перегрева представляют в виде произведения:

$$\Delta t = \Delta t_p k_1 k_2 \dots k_n, \quad (16)$$

где  $\Delta t$  – искомая среднеповерхностная температура перегрева нагретой зоны;  $\Delta t_p$  – базовый перегрев, определяемый мощностью, приходящейся на единицу поверхности нагретой зоны,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $k_1, k_2, \dots, k_n$  – коэффициенты, учитывающие различные факторы, влияющие на условия теплообмена, причем каждый коэффициент зависит только от одного параметра.

Для различных, часто встречающихся на практике случаев заранее рассчитаны графики, по которым можно определить все входящие в (16) сомножители. Некоторые из этих графиков приведены на рис. 8.

Определение размеров и параметров нагретой зоны. Для упрощенной тепловой модели, когда вычисляется среднеповерхностная температура нагретой зоны, определить ее эквивалентные размеры можно по следующим формулам.

Объем корпуса ( $\text{M}^3$ )

$$V_{an} = L_1 L_2 h, \quad (17)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  – размеры нижней стенки корпуса РЭС, м;  $h$  – высота корпуса, м (рис. 9, а-г).

Объем деталей  $V_d$  равен сумме объема шасси и объемов всех деталей, установленных на нем.

Для РЭС кассетной конструкции объем деталей равен сумме объемов всех плат и всех деталей, установленных на них.

Коэффициент заполнения объема РЭС

$$k_3 = V_d / V_{an}. \quad (18)$$

Приведенный размер основания нагретой зоны

$$l_{np} = \sqrt{L_1 L_2}. \quad (19)$$

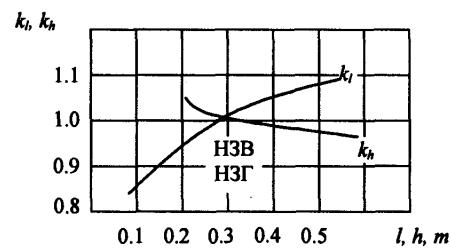
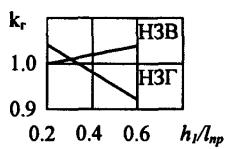
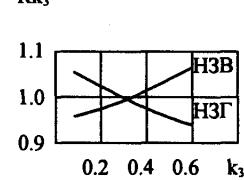
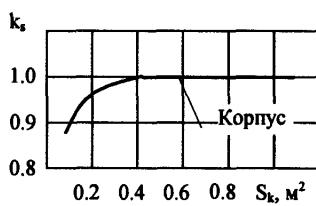
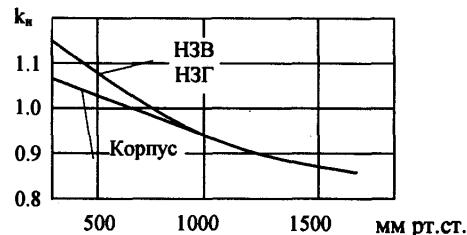
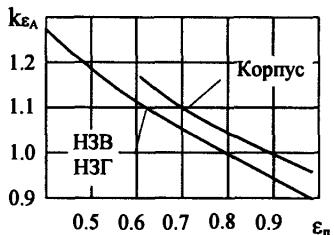
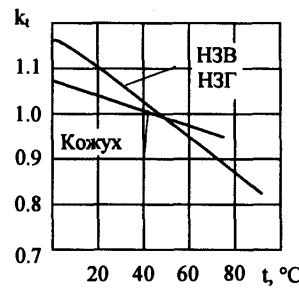
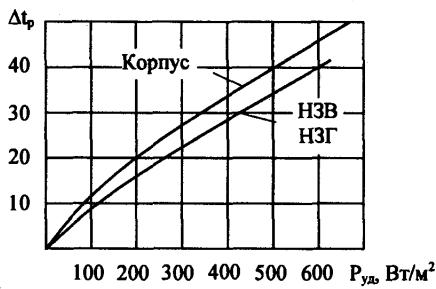


Рис. 8. Графики для расчета средней температуры корпуса и нагретой зоны коэффициентным методом:  
НЗВ – нагретая зона с вертикальной ориентацией;  
НЗГ – нагретая зона с горизонтальной ориентацией.

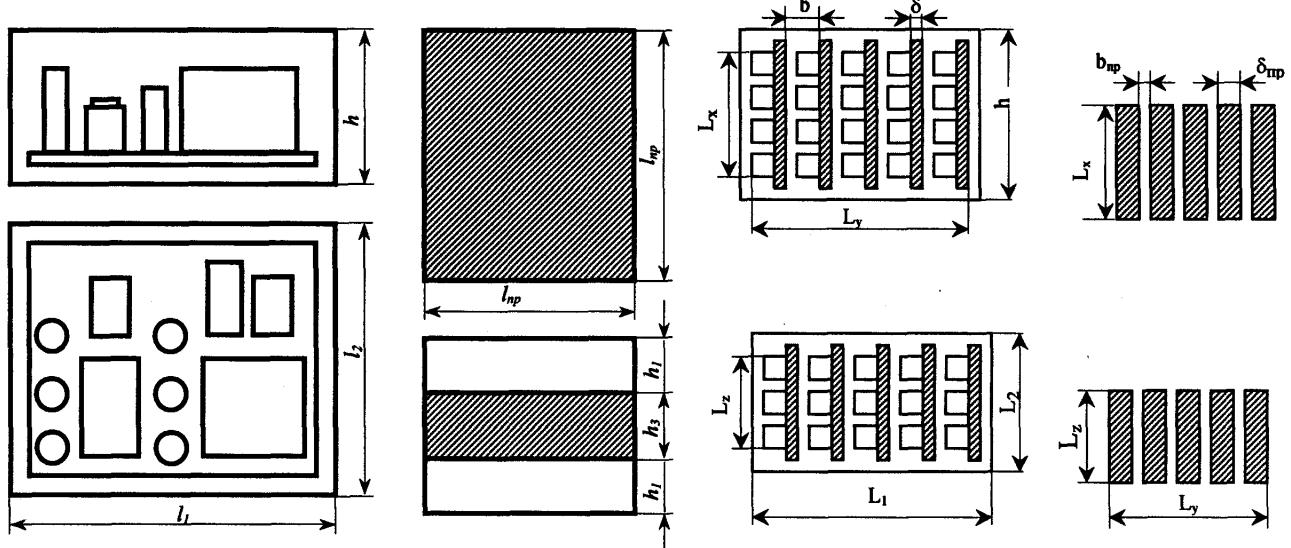


Рис. 9. Изделие и его нагретая зона

Приведенная высота нагретой зоны

$$h_3 = h k_3, \quad (20)$$

Приведенная высота воздушного зазора (м) (см. рис. 9) между нагретой зоной и кожухом

$$h_1 = (h - h_3)/2. \quad (21)$$

Геометрический фактор

$$k_e = h_1 / l_{np}, \quad (22)$$

где  $l_{np}$  определено формулой (19).

Поверхность корпуса РЭС

$$S_k = 2(L_1 L_2 + L_1 h + L_2 h), \quad (23)$$

где все размеры (в м) показаны на рис. 9.

Приведенную поверхность нагретой зоны можно вычислить по формуле

$$S_3 = 2l_{np}(l_{np} + 2h_3). \quad (24)$$

Удельная поверхностная мощность корпуса и нагретой зоны может быть вычислена по формулам

$$P_{y\partial.k} = P / S_k \quad (25)$$

$$P_{y\partial.3} = P / S_3, \quad (26)$$

где  $P$  – мощность, выделяемая в корпусе или нагретой зоне, Вт;  $S$  – поверхность,  $\text{м}^2$ .

В зависимости от ориентации шасси в кожухе будем различать нагретую зону с горизонтальной и вертикальной ориентациями.

Для РЭС кассетной конструкции ориентацию нагретой зоны считают вертикальной, если в зазорах между кассетами существует теплоперенос за счет конвективных потоков воздуха. Следует учитывать, что даже при вертикальном расположении зазора конвективный теплоперенос фактически отсутствует, если выполняется хотя бы одно из трех перечисленных далее условий: а) средний зазор между поверхностью деталей и плоскостью соседней кассеты не превышает 2–3 мм; б) давление внутри РЭС менее 10 мм рт. ст.; в) РЭС находится в условиях невесомости.

Поэтому при соблюдении перечисленных условий ориентацию нагретой зоны для РЭС кассетной конструкции следует условно считать горизонтальной.

Для расчета среднеповерхностной температуры кассет в РЭС с вертикальной ориентацией нагретой зоны необходимо ввести дополнительные геометрические характеристики (исходные данные указаны на рис. 9).

Поверхность нагретой зоны, состоящей из нескольких кассет:

$$S_{31} = 2(L_x L_y + L_x L_z + L_z L_y), \quad (27)$$

где  $L_x, L_y, L_z$  выражены в м;  $S_{31}$  – в  $\text{м}^2$ .

Приведенная высота деталей, размещенных на кассете:

$$h_{np} = V_\delta / (L_x L_z), \quad (28)$$

где  $V_\delta$  – сумма объемов всех деталей, расположенных на кассете, м<sup>3</sup>.

Приведенная толщина кассеты:

$$\delta_{np} = \delta + h_{np}, \quad (29)$$

где  $\delta$  – толщина печатной платы, на которой закреплены детали, м.

Приведенная толщина (м) зазора между кассетами:

$$b_{np} = b - h_{np}, \quad (30)$$

где  $b$  – расстояние между печатными платами, м.

Площадь (м<sup>2</sup>) поверхностей кассет, обращенных друг к другу:

$$S_{32} = 2L_x L_y (m - 1), \quad (31)$$

где  $m$  – число кассет.

Площадь поверхностей плат, излучающих лучевую энергию в сторону кожуха:

$$S_{33} = 2[L_x L_y + m\delta_{np}(L_x + L_z)], \quad (32)$$

где  $m$  – число кассет.

*Расчет средней поверхностной температуры корпуса РЭС.* Средняя поверхностная температура корпуса РЭС  $t_k$  может быть найдена по формуле

$$t_k = t_{okp} + \Delta t_k, \quad (33)$$

где  $t_{okp}$  – температура окружающей среды, °C;  $\Delta t_k$  – среднеповерхностный перегрев корпуса (°C), который можно найти по формуле

$$\Delta t_k = \Delta t_p K_s K_t K_e K_H. \quad (34)$$

В формуле (34) базовый перегрев  $\Delta t_p$  зависит от удельной мощности  $P_{y\delta,k}$ , а коэффициенты  $k$  зависят соответственно от площади поверхности корпуса РЭС  $S_k$ , температуры окружающей среды  $t_{okp}$ , степени относительной черноты поверхности  $\varepsilon_n$  и давления воздуха  $H$ . На рис. 8 приведены графики, позволяющие найти все входящие в (34) сомножители для давления воздуха 400–1500 мм рт. ст. и его температуры от 0 до 60 °C.

*Расчет среднеповерхностной температуры нагретой зоны.* Среднеповерхностную температуру нагретой зоны можно вычислить по формуле

$$t_3 = t_k + \Delta t_3, \quad (35)$$

где  $t_k$  – средняя температура корпуса, град [см. (33)];  $\Delta t_3$  – превышение средней температуры нагретой зоны над температурой корпуса, °C;

$$\Delta t_3 = \Delta t_{p,3} k_{l_{np}} k_{k_3} k_h k_{k_2} k_{\varepsilon n} k_{t_k} k_H. \quad (36)$$

Параметры  $l_{np}$ ,  $k_3$ ,  $k_2$ ,  $\varepsilon_n$  определены формулами (18, 19, 22).

Высота корпуса  $h$  и давление воздуха  $H$  должны быть известны конструктору;  $t_k$  – средняя температура корпуса, в которых помещен аппарат [см. (33)];  $\Delta t_{p,3}$  зависит от  $P_{y\delta}$ . Соответствующие коэффициенты и  $\Delta t_{p,3}$  можно найти по графикам рис. 8, которые справедливы для давлений 400–1500 мм рт. ст.

*Приближенная оценка среднеповерхностной температуры корпуса и среднеповерхностной температуры кассет для аппаратуры с вертикальной ориентацией нагретой зоны.*

1. Кожух с уплотнением. Оценка указанных параметров может быть произведена с погрешностью порядка  $\pm 40\%$  по приведенным далее формулам.

Средний перегрев корпуса по сравнению с температурой окружающей среды ( $^{\circ}\text{C}$ )

$$\Delta t_k = P / (9S_k), \quad (37)$$

где  $P$  – выделяемая в аппарате мощность, Вт;  $S_k$  – площадь поверхности корпуса,  $\text{m}^2$  [см. (23)].

Средний перегрев поверхности кассет над температурой окружающей среды ( $^{\circ}\text{C}$ )

$$\Delta t_{kac} = \Delta t_k (1 + CA), \quad (38)$$

где

$$A = 1 + \frac{S_k}{S_{33} + \frac{0.055}{b_{np}} S_{32}}, \quad (39)$$

$$C = \frac{4.55 S_k}{S_k + 3 S_{31} A}. \quad (40)$$

Входящие в эти формулы параметры  $S_k$ ,  $S_{31}$ ,  $S_{32}$ ,  $S_{33}$  и  $b_{np}$  определены формулами (23, 27, 30, 31, 32).

2. Кожух с перфорациями. Для учета влияния перфораций на температуру нагрева следует вычислить коэффициент перфорации

$$k_n = S_0 / (L_1 L_2), \quad (41)$$

где  $S_0$  – суммарная площадь отверстий в дне кожуха,  $\text{m}^2$  (предполагается, что площадь отверстий в дне и крышке одинакова);  $L_1$  и  $L_2$  – размеры дна аппарата, м.

После этого по графику рис. 10 можно найти коэффициент  $a$ .

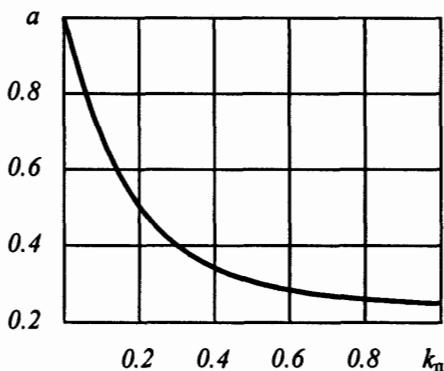


Рис. 10. Зависимость теплообмена конвекцией от коэффициента перфорации.

## Среднеповерхностная температура перегрева с учетом влияния перфорации

$$\Delta t_{\text{kac},n} = a \Delta t_{\text{kac}}, \quad (42)$$

где  $\Delta t_{\text{kac}}$  – среднеповерхностная температура кассет, найденная по (38).

Вычисленное по приведенным формулам значение перегрева характеризует среднюю температуру нагретой зоны, но никоим образом не характеризует температуру в любой ее точке.

В радиотехнических устройствах тепловая энергия выделяется в отдельных узлах и приборах, таких, как радиолампы, моторы, трансформаторы, резисторы, полупроводниковые приборы, микросхемы и т.д.

Ввиду того, что указанные элементы размещены по объему РЭС неравномерно, в отдельных его точках получается концентрация тепловой энергии, сопровождаемая местным повышением температуры. При этом в тяжелых температурных условиях могут оказаться как сами источники нагрева, так и другие узлы и приборы, расположенные в непосредственной близости.

Конструктор обязан принять меры к тому, чтобы температура нагрева для любого элемента не превышала допустимых значений. При решении этой задачи приходится идти по двум путям: снижению общей (средней) температуры нагрева РЭС и отвод теплоты от отдельных наиболее нагретых участков объема.

Для охлаждения РЭС следует в первую очередь интенсифицировать процесс радиации за счет окраски как внутренней, так и наружной поверхности футляра темными красками, имеющими матовую или шероховатую поверхность.

Интенсификация как радиации, так и конвекции может быть достигнута при некотором увеличении объема РЭС, если увеличить поверхность теплоотдачи за счет размещения на футляре ребер. Указанные ребра нужно изготавливать из материала с хорошей теплопроводностью; они должны иметь хороший тепловой контакт с поверхностью футляра. Пример выполнения футляра с ребрами приведен на рис. 11, а.

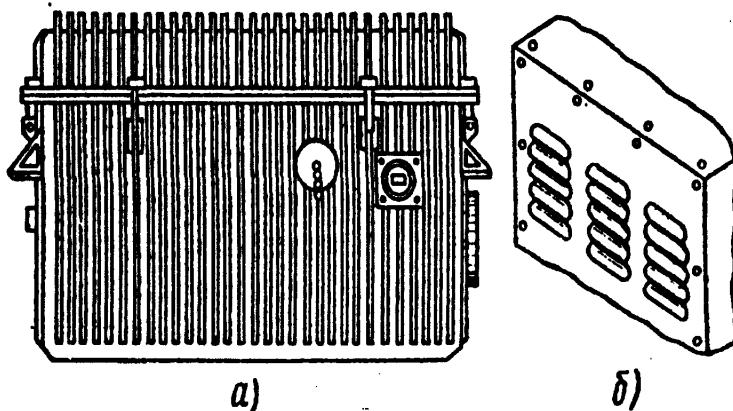


Рис. 11. Футляр:  
а – с ребрами; б – с жалюзи.

Наоборот, узлы и приборы, которые нужно защитить от теплового воздействия со стороны соседних нагревающихся устройств, должны иметь светлую блестящую поверхность. С целью дополнительной защиты таких устройств можно между ними и источником нагрева установить тепловые экраны с хорошей теплопроводностью, тщательно соединенные с шасси и имеющие гладкую блестящую поверхность (например, из алюминия). Пример выполнения экрана приведен на рис. 12. Расположение сильно нагревающихся элементов по краям шасси в непосредственной близости от стенок футляра улучшает отдачу теплоты от этих элементов к стенкам и способствует понижению температуры внутри аппарата. Около наиболее нагретых узлов и приборов в шасси можно делать отверстия: холодный воздух из-под шасси будет поступать к источникам теплоты и охлаждать их.

Если снабдить стенки футляра жалюзи или отверстиями, то будет иметь место циркуляция воздуха непосредственно внутри аппарата, что снизит температуру узлов и приборов, как это следует из (42). Отверстия следует располагать в нижней и в верхней частях футляра аппарата так, чтобы восходящие потоки воздуха омывали большую поверхность нагревающих элементов.

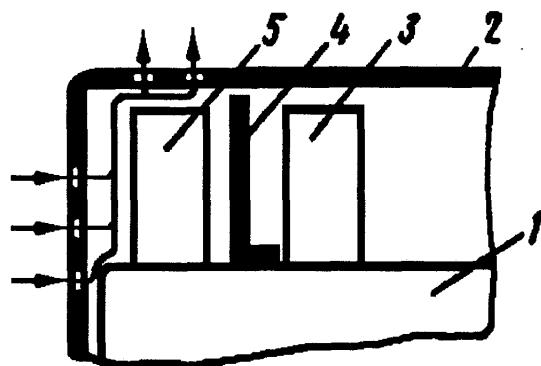


Рис. 12. Схема охлаждения:

1 – шасси; 2 – футляр; 3 – узел, защищенный от нагрева; 4 – тепловой экран; 5 – нагревающий узел (стрелками показано направление конвекционного потока воздуха).

Охлаждение происходит тем интенсивнее, чем больше зазор между расположенными по соседству узлами и приборами. При работе аппаратуры на большой высоте теплоотдача за счет конвекции уменьшается из-за уменьшения плотности и теплоемкости воздуха. Следует иметь в виду, что введение отверстий или жалюзи недопустимо в аппаратуре, работающей в условиях запыленного воздуха, а также, если внутри футляра расположены незащищенные от воздействия пыли точные механизмы, контакты реле, элементы схемы с высоким напряжением и другие устройства, работа которых может быть нарушена осаждающейся пылью.

Если перечисленные меры не позволяют получить требуемые значения температуры внутри РЭС, то следует увеличить его объем или перейти к более сложным, но и более эффективным системам охлаждения, которые были рассмотрены (принудительная циркуляция воздуха, жидкостные системы охлаждения).

Большая часть тепловой энергии от нагревающихся элементов передается шасси аппарата. С целью отвода теплоты от горячих зон конструкцию шасси следует делать максимально теплоотводной (например, из алюминия). Теплоту, накапливающуюся в шасси, следует отводить в окружающее пространство, для чего шасси должно иметь хороший тепловой контакт с одной из стенок футляра.

Если на передней панели не располагаются термочувствительные элементы, то целесообразно наиболее сильно нагревающиеся узлы и приборы располагать в непосредственной близости от нее. Это создает наиболее короткий путь для теплового потока и уменьшает распространение теплоты в другие участки шасси, где могут располагаться термочувствительные элементы.

Наиболее интенсивно нагревающиеся узлы и приборы, температуру нагрева которых желательно снизить, должны иметь хороший тепловой контакт с шасси; они должны соединяться с шасси устройствами из материалов с хорошей теплопроводностью. Поверхности таких узлов и приборов должны быть выкрашены темной матовой краской. Если сильно нагревающийся элемент заключен в экран, то его внутренняя и наружная поверхность также должны быть окрашены в темный цвет.

**Радиаторы.** Радиаторами называют устройства, предназначенные для отвода теплоты от отдельных сильно нагревающихся устройств (обычно полупроводниковых приборов средней и большой мощности) в окружающее пространство.

Чтобы радиатор эффективно выполнял свои функции, он должен обладать следующими свойствами: 1) тепловое сопротивление в месте контактирования источника тепловой энергии (например, корпуса транзистора) с радиатором должно быть минимальным; 2) поверхность радиатора, отдающая теплоту окружающему воздуху, должна быть максимально возможной; 3) тепловое сопротивление радиатора должно быть минимальным.

На рис. 13 показаны три варианта конструкции радиатора: штырьковой, с ребрами в виде пластин и без ребер.

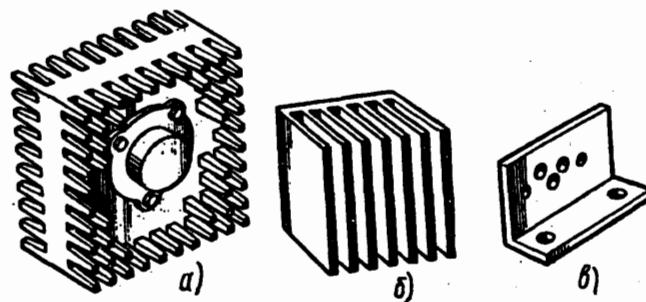


Рис. 13. Радиаторы:  
а – штырьковый; б – пластинчатый; в – без ребер.

Штырьковый радиатор обладает наиболее развитой поверхностью и поэтому может обеспечить требуемую температуру корпуса полупроводникового прибора (ППП) при минимальных габаритах радиатора. Наихудшей теплоотдачей в окружающее пространство обладает радиатор без ребер; радиатор с ребрами в виде пластин занимает промежуточное положение между двумя названными.

Чтобы иметь малое тепловое сопротивление между корпусом ППП и радиатором, необходимо обеспечить большую площадь соприкосновения двух деталей. Поэтому поверхность радиатора в месте соприкосновения с ППП тщательно обрабатывают, так как микронеровности поверхности резко сокращают фактическую площадь теплового контакта. Иногда между двумя телами, которые должны иметь хороший тепловой контакт, устанавливают прокладку из мягкого и хорошо теплопроводящего материала (например, из отожженной меди) или вводят специальные теплопроводящие пасты. Для контакта без прокладок и пасты приближенно

$$R_{IT} \approx 2,2 / S_k, \quad (43)$$

где  $R_{IT}$  – тепловое сопротивление, град/Вт;  $S_k$  – площадь контактной поверхности двух тел, см<sup>2</sup>.

Воспользовавшись формулой (16), можно найти превышение температуры корпуса ППП над температурой радиатора в месте установки ППП:

$$\Delta t_1 = P_T R_{IT}, \quad (44)$$

где  $\Delta t_1$  – превышение температуры, град;  $P_T$  – выделяемая в ППП мощность, Вт.

Бывают случаи, когда ППП, установленный на радиаторе, должен быть изолирован от него. В этом случае приходится устанавливать между корпусом ППП и радиатором изоляционные прокладки.

Пример крепления ППП через изоляционную прокладку показан на рис. 14.

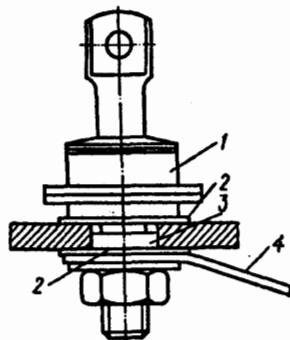


Рис. 14. Крепление мощного полупроводникового диода:

1 – диод; 2 – изоляционная шайба из слюды;

3 – центрирующая изоляционная втулка; 4 – контактный лепесток.

Следует иметь в виду, что любая изоляционная прокладка увеличивает тепловое сопротивление между корпусом ППП и радиатором. Например, прокладка

из слюды толщиной 0.025–0.05 мм увеличивает  $R_T$  в 1.5 раза. Лучшие результаты дает использование прокладок из бериллиевой керамики.

Если схема и конструкция позволяют, то следует при необходимости изолировать сам радиатор от шасси изделия, а ППП – крепить к радиатору без изоляционных прокладок.

Тепловое сопротивление радиатора  $R_{2T}$  зависит не только от конфигурации и размеров, но и от конструктивного исполнения.

Имеют минимальное тепловое сопротивление, т.е. наиболее эффективно отводят теплоту от корпуса ППП, радиаторы, выполненные из материала с хорошей теплопроводностью и имеющие монолитную конструкцию. Поэтому обычно радиаторы делают методом литья из алюминиевых, магниевых и других сплавов. Чтобы тепловая энергия, отдаваемая радиатором в окружающее пространство, не ухудшала условия работы других ЭРЭ, радиаторы стараются размещать вне объема корпуса, на его наружной стенке.

**Пример.** Произвести приближенную оценку среднеповерхностной температуры корпуса и среднеповерхностной температуры кассет с вертикальной ориентацией рабочей зоны по следующим исходным данным (см. рис. 9):  $L_1 = 54.5$  мм;  $L_2 = 257$  мм;  $h = 170$  мм;  $L_y = 42.5$  мм;  $L_z = 250$  мм;  $L_x = 150$  мм;  $b = 12$  мм;  $\delta = 1.5$  мм; число кассет  $m = 4$ .

Для каждой кассеты в среднем суммарный объем деталей  $V_\delta = 7 \cdot 10^4$  мм<sup>3</sup>.

Выделяемая в изделии мощность  $P = 11.4$  Вт. Температура окружающей среды  $t_{окр} = 60$  °С.

1. По (28) вычисляем приведенную высоту деталей, размещенных на кассете:

$$h_{np} = V_d / L_x L_z = 7 \cdot 10^4 / 150 \cdot 250 = 1.86 \text{ мм.}$$

2. По (29) находим приведенную толщину кассеты

$$\delta_{np} = \delta + h_{np} = 1.5 + 1.86 = 3.36 \text{ мм.}$$

3. По (30) находим приведенную величину зазора между кассетами

$$b_{np} = b - h_{np} = 12 - 1.86 = 10.14 \text{ мм.}$$

4. По (27) вычисляем поверхность рабочей зоны, охватывающей четыре кассеты

$$\begin{aligned} S_{31} &= 2(L_x L_y + L_x L_z + L_z L_y) = \\ &= 2(150 \cdot 42.5 + 150 \cdot 250 + 250 \cdot 42.5) = 10.9 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2. \end{aligned}$$

5. По (31) вычисляем площадь поверхности кассет, обращенных друг к другу:

$$S_{32} = 2L_x L_y(m - 1) = 2 \cdot 150 \cdot 250(4 - 1) = 22.5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2.$$

6. По (32) находим площадь поверхности кассет, передающих энергию в сторону кожуха:

$$\begin{aligned} S_{33} &= 2[L_x L_y + m\delta_{np}(L_x + L_z)] = 2[150 \cdot 250 + \\ &+ 4 \cdot 3.36(150 + 250)] = 4.29 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2. \end{aligned}$$

7. По (23) определяем поверхность корпуса аппарата

$$S_k = 2(L_1 L_2 + h L_1 + h L_2) = 2 \cdot (54.4 \cdot 257 + 54.4 \cdot 170 + 257 \cdot 170) = 13.38 \cdot 10^2 \text{ м}^2$$

$$A = 1 + \frac{S_k}{S_{33} + 0.055 S_{32} / b_{np}} = 1 + \frac{13.38 \cdot 10^4}{4.29 \cdot 10^4 + 0.055 \cdot 22.5 \cdot 10^4 / 10.14} = 4.04.$$

8. По (39) вычисляем значение коэффициента

$$C = \frac{4.55 S_k}{S_k + 3 S_{31} A} = \frac{4.55 \cdot 13.38 \cdot 10^4}{13.38 + 3 \cdot 10.9 \cdot 10^4 \cdot 4.04} = 0.423.$$

9. По (40) вычисляем значение коэффициента

10. По (37) находим средний перегрев корпуса над температурой окружающей среды

$$\Delta t_k = P/(9S_k) = 11.4/(9 \cdot 13.38 \cdot 10^{-2}) = 9.4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

11. По (38) вычисляем средний перегрев поверхности кассет над поверхностью окружающего воздуха

$$\Delta t_{kac} = \Delta t_k (1 + CA) = 9.4 (1 + 0.423 \cdot 4.04) = 16 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

12. По (33) находим среднюю температуру кожуха

$$t_k = \Delta t_{okp} + \Delta t_k = 60 + 9.4 = 69.4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

13. Вычисляем среднеповерхностную температуру кассет

$$t_{kac} = t_{okp} + \Delta t_{kac} = 60 + 16 = 76 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

### 3.5. Способы обеспечения нормального теплового режима РЭС

В зависимости от выделяемой тепловой энергии и температуры окружающей среды, как уже было упомянуто, РЭС необходимо охлаждать или нагревать. При удельной тепловой нагрузке  $q > 0.5 \text{ Вт/м}^2$  обычно требуется применять системы охлаждения и основные конструктивные трудности связаны с проблемами отвода тепла /1/.

Имеется много систем охлаждения, и они характеризуются рядом факторов. По способу поглощения тепла различают системы на основе фазовых переходов (испарения, плавление) веществ, и термоэлектрического эффекта и термоаккумуляционные системы. Теплоносителями могут служить газы, жидкости, твердые тела.

В системах применяют естественное и принудительное охлаждение.

К естественному охлаждению относятся системы, где охлаждение происходит наружной средой поверхности аппарата или естественно-испарительными фитильными устройствами (тепловыми трубками).

Естественное воздушное охлаждение является наиболее простым, надежным и дешевым способом, однако использование этого способа возможно при небольших удельных мощностях. Кроме того, эффективность способа падает при снижении атмосферного давления ниже  $5.6 \cdot 10^4 \text{ Па}$ .

Тепловая трубка представляет собой замкнутую камеру, состоящую из полого цилиндра с большим отношением длины к диаметру. Внутренняя поверхность трубы покрыта пористой структурой (фитилем), насыщенной смачивающей жидкостью. Смачивающая жидкость является теплоносителем. При подводе тепла к одному из концов трубы (испарительной зоны) теплоноситель в этой части начинает испаряться, и пары поступают в противоположный конец трубы, где происходит конденсация пара и передача тепла. Между этими зонами возникают небольшие температурные градиенты, поэтому можно считать, что таким путем переносится практически вся тепловая энергия. С помощью тепловых труб тепло отдается от теплонаагруженных элементов и выносится за пределы РЭС, создавая внутри прибора более равномерное температурное поле.

Естественное воздушное охлаждение широко используется не только для общего охлаждения аппаратов, но и для охлаждения отдельных тепловыделяющих элементов, например транзисторов. Повышение эффективности достигается увеличением теплоотдающей поверхности с помощью радиаторов. Конструкции радиаторов очень разнообразны, однако наибольшее распространение получили радиаторы с ребрами пластинчатой, штырьковой и игольчатой форм. Выбор и расчет радиаторов приведены в /6/.

Принудительное охлаждение осуществляется продувкой внутренней зоны прибора воздухом, наружным обдувом его поверхности, перемешиванием воздуха внутри аппарата, использованием микрохолодильных и терmostатирующих устройств, термоэлектрических батарей, жидкостных и воздушных испарительных систем и за счет термоаккумуляционных свойств материалов.

Принудительная вентиляция подразделяется на приточную, вытяжную и приточно-вытяжную. Приточная вентиляция осуществляется нагнетанием в аппаратуру охлаждающего воздуха, а вытяжная – вытяжкой нагретого воздуха. Поступающий снаружи воздух в обоих случаях очищается от пыли и имеет нормальную влажность. Приточно-вытяжная вентиляция осуществляется нагнетанием холодного и одновременно вытяжкой из аппарата нагретого воздуха. Перемешивание воздуха осуществляется в замкнутом объеме аппарата с помощью вентилятора.

Наиболее эффективными являются жидкостно-испарительные системы, где охлаждение производится за счет циркуляции охлаждающей жидкости через специальные каналы в несущей конструкции или через радиаторы. Воздушно-испарительные устройства работают на основе испаряемых жидкостей с низкой температурой кипения.

Жидкостно-испарительные устройства охлаждения обладают высоким КПД и не зависят от условий окружающей среды.

Термоэлектрическое охлаждение основывается на использовании эффекта Пельтье, когда поглощение тепла происходит на одном спае полупроводникового элемента, а выделение его на другом. Эффективность охлаждения повышается применением термобатарей.

Поглощение тепла с помощью теплоаккумуляторов осуществляется в ограниченный отрезок времени за счет отвода тепла на элементы конструкции с определенной массой и температурой. Эффект охлаждения зависит от массы системы, начальной температуры поглотителя и его теплоемкости.

Принудительные системы охлаждения могут использоваться как для охлаждения аппаратуры в целом, так и для охлаждения отдельных мощных источников тепла.

Различные схемы, конструкции и расчет их систем охлаждения приведены в /6/.

Для снижения температурного фона в блоке РЭС при естественном воздушном охлаждении конструкция должна соответствовать следующим требованиям:

1. Обеспечивать хорошее обтекание холодным воздухом всех элементов конструкции, особенно теплонаагруженных.

2. Теплонагруженные элементы должны располагаться ближе к стенкам блока.

3. Теплочувствительные элементы должны защищаться от обтекания нагретым воздухом.

4. При воздействии лучистой энергии теплочувствительные элементы должны защищаться экранами.

5. Все теплонаагруженные ЭРЭ должны иметь хорошие тепловые контакты с теплоотводящими элементами (радиаторами, платами, кожухами и т.п.).

### **3.6. Выбор способа охлаждения**

Теплонагруженные блоки требуют принудительного охлаждения, вид и способ которого зависят от плотности теплового потока. Системы естественно-воздушного охлаждения позволяют отводить тепловые потоки плотностью до  $0.2 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ; принудительно-воздушного охлаждения до  $1 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ; жидкостного охлаждения до  $20 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ; и испарительного охлаждения – плотностью до  $200 \text{ Вт}/\text{см}^2$ .

Способ охлаждения во многом определяет конструкцию РЭС, поэтому уже на раннем этапе конструирования необходимо выбрать принцип теплоотвода. Для этого необходимо знать суммарную рассеиваемую мощность  $P$  в аппарате, диапазон изменения температуры окружающей среды, пределы изменения атмосферного давления, время непрерывной работы, допустимые температуры элементов  $T_i$  и коэффициент заполнения аппаратуры  $K_s$  /1/.

Выбор способа охлаждения на ранней стадии конструирования имеет вероятностный характер, поскольку он дает возможность оценивать вероятность обеспечения заданного по ТЗ температурного воздействия.

Выбор способа охлаждения РЭС, работающей в длительном режиме эксплуатации, можно выполнить с помощью графика, изображенного на рис. 15 /6/.

За основной показатель здесь принимается величина плотности теплового потока  $q = PK_p/S_3$ , где  $K_p$  – коэффициент, учитывающий давление воздуха (при нормальном атмосферном давлении  $K_p = 1$ );  $S$  – условная поверхность.

Вторым показателем служит допустимый перегрев элементов  $\Delta T$ . Незаштрихованные области в графике относятся к следующим способам охлаждения: естественное воздушное 1, принудительное воздушное 3, принудительное жидкостное 5, принудительное испарительное 9. Области второго типа заштрихованы. В них возможно применение естественного и принудительного воздушного охлаждения 2, принудительного жидкостного и жидкостного 4, принудительного жидкостного и естественного испарительного 6, принудительного жидкостного, принудительного и естественного испарительного 7, естественного и принудительного испарительного 8.

Если показания  $q$  и  $\Delta T$  попадают в заштрихованные области, то тогда однозначный выбор метода охлаждения осложняется и необходимо пользоваться дополнительными графиками, приведенными в /6/.

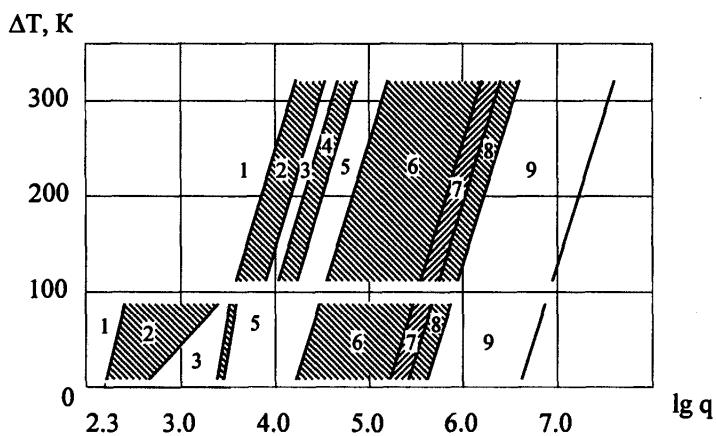


Рис. 15. Область целесообразного применения различных способов охлаждения.

#### 4. ЗАЩИТА РЭС ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

##### 4.1. Механические нагрузки, действующие на РЭС в процессе эксплуатации

В процессе производства, эксплуатации и хранения РЭС могут испытывать те или иные механические динамические воздействия, количественно характеризуемые диапазоном частот колебаний, а также их амплитудой, ускорением, временем действия /3/. Качественно все виды механических динамических воздействий делятся на вибрационные (вибрации), ударные (удары), инерционные (линейные ускорения). Под вибрацией РЭС обычно понимают длительные знакопеременные процессы в ее конструкции, которые влияют на работу РЭС. Ударом называют кратковременное воздействие, длительность которого примерно равна двойному времени распространения ударной волны через объект, подвергшийся удару. Удар сопровождается конечным изменением скорости движения тела за

время удара. В момент удара происходит колебание системы на вынужденной частоте, определяемой длительностью удара, а после него – на собственной частоте конструкции.

Линейные ускорения характерны для всех объектов, движущихся с переменной скоростью (например, при разгоне и торможении), а также при движении по криволинейной траектории (центробежное ускорение). В процессе работы может изменяться значение и направление линейного ускорения (например, при выключении стартового двигателя ракеты). Результат воздействия линейных ускорений на РЭС может носить характер динамический (при изменении ускорения до установившегося значения) или статический (после достижения установившегося значения).

Источниками механических воздействий могут быть: вибрации движущихся частей двигателя и движителя из-за несбалансированности их частей и наличия зазоров; акустические колебания, вызываемые взаимодействием турбулентных газовых потоков с корпусом реактивного двигателя; перегрузки при маневрировании; неровности дорог и стыки рельсов; аэродинамические и гидродинамические воздействия окружающей среды (ветер, волны, снежные лавины, землетрясения, обвалы и т.д.); взрывные воздействия; небрежность или неосторожность обслуживающего персонала (падение РЭС, удары при погрузочно-разгрузочных работах и пр.). Согласно проведенным в США исследованиям, от 22 до 41% отказов самолетного оборудования были вызваны действием механических нагрузок, а число отказов бортовых ЭВМ вследствие механических воздействий достигает 50%.

#### **4.2. Влияние механических воздействий на функционирование РЭС**

В результате воздействия вибраций, ударов и линейных ускорений могут иметь место следующие повреждения РЭС: нарушение герметичности вследствие нарушения паяных, сварных и kleевых швов и появления трещин в металлокерамических спаях; полное разрушение корпуса РЭС или отдельных его частей вследствие механического резонанса или усталости; обрыв монтажных связей, в том числе внешних выводов ИС; отслоение печатных проводников; отрыв навесных ЭРЭ; расслоение многослойных печатных плат; поломка (растрескивание) керамических и ситалловых подложек; временный или окончательный выход из строя разъемных и неразъемных электрических контактов (в реле, соединителях, цепях заземления, экранирования и т.д.); модуляция размеров волноводных трактов, коаксиальных кабелей, конденсаторов переменной емкости, колебательных контуров, электровакуумных приборов; изменение паразитных связей; смещение положения органов настройки и управления; выход из строя механических узлов (подшипников, зубчатых пар, крепежа и т.д.).

Под влиянием механических воздействий может произойти изменение параметров полупроводниковых приборов: вольт-амперных характеристик диодов с барьером Шотки, транзисторов и других приборов; емкости и напряжения пробоя --- переходов, некоторых характеристик диодов Ганна, коэффициента усиления транзисторов, длины волны излучения полупроводникового лазера и т.д. В основе этих изменений лежат явления смещения энергетических уровней, изменения

ширины запрещенной зоны при деформации; эффективной массы, времени жизни и подвижности носителей тока.

Механические воздействия на РЭС могут привести к изменению диаграммы направленности антенн, сбоям цифровых устройств, снижению чувствительности и смещению частотного диапазона приемников, повышению энергопотребления (при коротком замыкании), снижению точности работы. Это наиболее вероятно в тех случаях, когда компоненты РЭС одновременно подвергаются различным воздействиям: вибрациям, ударам, линейным ускорениям, монтажным усилиям (затяжка винтов), возникшим в результате полимеризации внутренним напряжениям в полимерах и напряжения в структурах из-за различия ТКЛР материалов и изменения температуры.

Механические воздействия характеризуются нагрузкой  $n$ , которая кратна ускорению силы тяжести  $g$ . Вибрации характеризуются также амплитудой колебаний и их частотой, а удар – длительностью, амплитудой и формой ударного импульса. Перегрузка объекта при вибрации выражается коэффициентом виброперегрузки  $n_{вбр} = xf^2/250$ , где  $x$  – амплитуда вибрации объекта, мм;  $f$  – частота колебаний, Гц. Амплитуда перегрузки ударного импульса, характеризующая максимальное значение ударного ускорения, может быть определена по формуле  $n_{уд} \approx 0.05V_{уд}/S$ , где  $S$  – перемещение соударяющихся тел с учетом амортизации, мм;  $V_{уд}$  – мгновенная скорость в момент удара, мм/с.

При перемещении по криволинейной траектории (например, при маневрировании летательного аппарата) линейное центробежное ускорение может быть определено по формуле  $n_{лн\ цб} = 4 \cdot 10^{-3}Rf_{об}^2$ , где  $n_{лн\ цб}$  – центробежная перегрузка при вращении;  $R$  – радиус вращения, мм;  $f_{об}$  – частота равномерного вращательного движения, Гц.

Наибольшую опасность представляет резонанс отдельных компонентов и узлов, возникающая в случаях, когда их собственная частота ( $f_0$ ) совпадает с частотой действующих на аппаратуру вибраций ( $f$ ). Собственная частота компонентов и узлов конструкции может быть определена по формуле  $f_0 = (1/2\pi) \sqrt{K/m}$ , где  $K$  – коэффициент жесткости конструкции, Н/м, определяемый как отношение силы к деформации, вызванной этой силой;  $m$  – масса конструкции, кг. Поведение конструкции при воздействии механических колебаний зависит от соотношения действующей и собственной частот конструкции, называемого коэффициентом расстройки:  $\gamma = f/f_0$ . Для виброизолирующих систем коэффициент расстройки стараются выбрать более 1.41, а для жесткозакрепленных компонентов – равным 0.8...0.3. При  $\gamma=1$  режим соответствует резонансному.

Устойчивость РЭС к механическим воздействиям принято характеризовать ее вибропрочностью и виброустойчивостью. Первая характеристика связана с транспортной вибрацией (аппаратура выключена), вторая – с эксплуатационной (аппаратура включена). *Вибропрочностью* называют способность конструкции противостоять разрушающему воздействию вибрации в заданном диапазоне частот и ускорений (не должно происходить силовых и усталостных разрушений). *Виброустойчивостью* называют способность конструкции РЭС выполнять свои функции при вибрации в заданных диапазонах частот и ускорений (не должно

происходить изменения параметров РЭС: чувствительность, мощности излучения, паразитной модуляции, перемежающихся отказов и т.д.). Под прочностью понимают способность конструкции выдерживать нагрузки без остаточной деформации и разрушений.

Характер воздействий зависит от типа РЭС и условий эксплуатации. Стационарная аппаратура подвергается в основном ударным воздействиям с ускорением до  $2g$ , вибрациями с частотой от 10 до 55 Гц при транспортировании.

Для судовых РЭС характерны удары и вибрации с низкой частотой от 1 до 15 Гц, самолетные приборы воспринимают вибрации с частотой до 2000 Гц и ударные перегрузки с ускорением до  $30g$ .

Задача РЭС от механических воздействий осуществляется следующими группами методов: 1) уменьшается интенсивность источников механических воздействий (путем их балансировки, уменьшения зазоров, виброизоляции самого источника механических воздействий); 2) уменьшается величина передаваемых РЭС воздействий (путем его виброизоляции, демпфирования, устранения резонансов, активной виброзащиты с помощью эксцентриков, маятников, гироскопов); 3) используются наиболее прочные компоненты и узлы.

Методы первой группы применяют специалисты по двигателям и транспортным средствам. Методы второй и третьей групп используют конструкторы РЭС, однако методы активной виброзащиты имеют ограниченное применение по причине высокой сложности и низкой надежности технических решений.

#### **4.3. Защита РЭС от механических воздействий методом виброизоляции**

Принцип виброизоляции заключается в размещении между объектом установки и РЭС специальных устройств—амортизаторов, которые поглощают и отражают механическую энергию. Поглощение энергии колебаний происходит демпфированием за счет трения в материале амортизаторов или в демпферах с сухим или вязким трением между элементами конструкции. Эффективность виброизоляции оценивается коэффициентом виброизоляции  $\gamma$ , равным отношению амплитуды возмущающих колебаний к амплитуде вынужденных колебаний амортизированного РЭС /1/.

В наиболее простом случае объект установки с массой  $M$  (см. рис. 16) совершает колебания  $\xi(t)=A \sin \omega t$ . Амплитуду колебаний  $A$  от объекта установки до РЭС с массой  $m$  здесь ослабляют амортизаторы с жесткостью  $k$  и демпфированием  $\beta$ . Уравнение движения данной системы можно записать в виде неоднородного дифференциального уравнения.

Колебания РЭС  $x(t)$  находят как сумму общего и частного решения этого уравнения. В установившемся режиме в системе возникают колебания с частотой  $\omega$  и амплитудой

$$D = A \sqrt{\frac{1 + [\beta^2(k/m)](\omega/\omega_0)^2}{[1 - (\omega/\omega_0)^2]^2 + [\beta^2/(k/m)](\omega/\omega_0)^2}}. \quad (45)$$

Пренебрегая демпфированием, получаем соотношение для коэффициента виброизоляции

$$\gamma = A/D = |1 - (\omega/\omega_0)^2|. \quad (46)$$

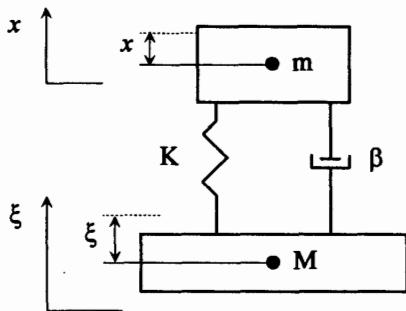


Рис. 16. Схема амортизированных РЭС

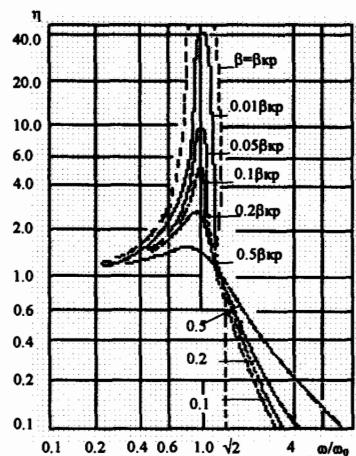


Рис.17. Зависимость коэффициента динамичности  $\eta$  от  $\omega/\omega_0$ .

Величина, обратная коэффициенту вибропоглощения, называется коэффициентом динамичности  $\eta$ . На рис. 17 показана зависимость коэффициента динамичности  $\eta$  от отношения  $\omega/\omega_0$  при различных значениях демпфирования. Из графиков видно, что амортизаторы функционируют лишь в области частот  $\omega/\omega_0 > \sqrt{2}$  и эффект вибропоглощения повышается при ослаблении демпфирования. В области резонанса ( $\omega = \omega_0$ ) амортизаторы ухудшают вибропоглощение, особенно при низком демпфировании, а в области  $\omega/\omega_0 < 1$  вибропоглощение отсутствует. Из сказанного следует, что собственная частота должна быть значительно ниже возмущающих частот.

При выборе амортизаторов часто возникает противоречие между вышеизложенными соображениями для защиты РЭС от вибраций и требованиями к защите от ударов и линейных ускорений. Дело в том, что малая жесткость (низкая собственная частота) и ход амортизаторов в случае удара приводят к их чрезмерной деформации, в предельном случае до упора, вызывая значительные перегрузки. Проблему решают применением амортизаторов с нелинейной характеристикой, у которых демпфирование изменяется в зависимости от статической нагрузки.

Основными параметрами амортизаторов, таким образом, являются их собственная частота (при номинальной статической нагрузке), статическая нагрузка, коэффициент демпфирования и показатели климатических воздействий. В зависимости от частоты собственных колебаний все амортизаторы делятся на низкочастотные, среднечастотные и высокочастотные.

Амортизаторы, выпускаемые промышленностью можно разделить на две группы: металлорезиновые (типа АП, АКСС-М, АКСС-И, АО и др.), у которых между металлическими частями крепления к прибору и основанию запрессован упругий элемент из специальной резины, и металлопружинные (типа АПН, ДК, АТ и др.), представляющие собой комбинированные устройства, состоящие из пружин и демпфирующих элементов с ограничителями хода. Первая группа амортизаторов отличается компактностью, малой стоимостью и высокими шумоизоляционными свойствами, однако они сильно зависят от температуры среды и бы-

стро стареют. Амортизаторы второй группы долговечны и мало зависят от температуры, но слабо изолируют в области звуковых частот. Конструкция и параметры ряда амортизаторов приведены в /2/.

*Схемы расположения амортизаторов.* При выборе схемы расположения амортизаторов руководствуются соображениями по сужению спектра собственных частот и снижению угловых колебаний РЭС. Наиболее рационально в этом плане крепление амортизаторов, когда центр тяжести прибора совпадает с центром жесткости, а общая грузоподъемность всех амортизаторов равна массе РЭС. Центром жесткости системы амортизации называется точка приложения равнодействующей параллельных сил, которые являются реакциями амортизаторов на внешнее воздействие и пропорциональны жесткости амортизаторов. Центр тяжести и центр жесткости определяются по правилам теоретической механики.

Условия рациональной системы амортизации /9/:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N P_i &= G; & \sum_{i=1}^N P_i x_i &= 0; & \sum_{i=1}^N P_i y_i &= 0; \\ \sum_{i=1}^N P_i z_i &= 0; & \sum_{i=1}^N P_i y_i x_i &= 0; \\ \sum_{i=1}^N P_i x_i z_i &= 0; & \sum_{i=1}^N P_i z_i y_i &= 0, \end{aligned} \quad (47)$$

где  $P_i$  – статическая нагрузка на один амортизатор;  $G$  – масса РЭС;  $x_i, y_i, z_i$  – координаты расположения амортизаторов.

Если амортизаторы расположены в горизонтальной плоскости  $XOY$ , то тогда  $z=0$  и из семи уравнений системы остаются только первые четыре. Система амортизаторов является статически определенной, если число амортизаторов не превышает трех.

Статическая деформация амортизаторов  $z_{icm}=P_i/k_i$ , где  $k_i$  – жесткость амортизатора.

Схемы расположения амортизаторов относительно центра тяжести на практике могут быть самыми разнообразными, и их выбор, кроме условий (47) зависит от конкретных требований эксплуатации, особенностей объекта установки и других факторов.

На рисунке 18 показаны некоторые варианты размещения амортизаторов. Наиболее простой является схема защиты от вибраций, приведенная на рис. 18,а, но она плохо защищает от боковых ударов. Схема, представленная на рис. 18,б, надежно защищает РЭС от пространственных нагрузок. Монтаж в диагональной плоскости (рис. 18, в) увеличивает устойчивость системы. Установка дополнительных амортизаторов в верхней части прибора защищает РЭС, у которых высота больше ширины более чем в два раза. Двусторонний монтаж (рис. 18, д) увеличивает жесткость амортизационной системы, сдвигая ее собственную частоту в область более высоких частот. Схемы монтажа под углом (рис. 18, е и ж) снижают до минимума вращательные колебания, однако конструктивно являются более сложными.

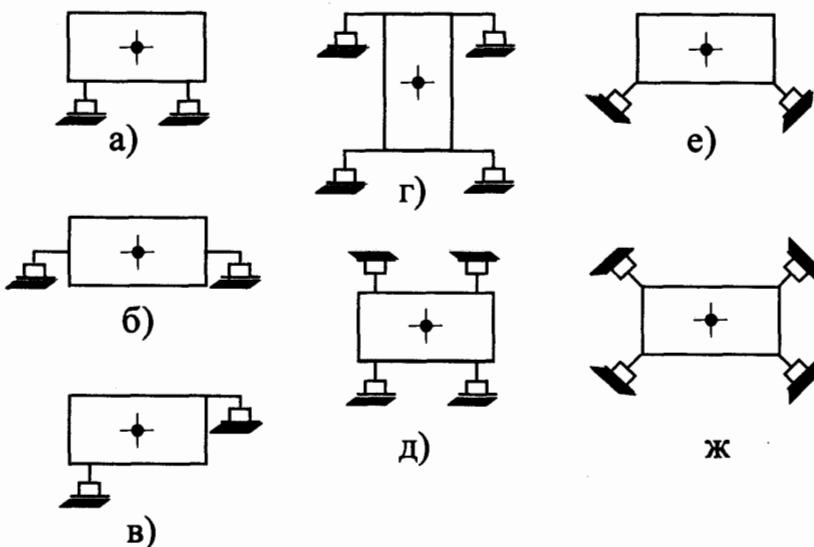


Рис. 18. Варианты расположения амортизаторов.

#### 4.4. Защита РЭС от механических воздействий, обеспечением прочности и жесткости элементов конструкций

Обеспечение прочности и жесткости элементов конструкций (плат, деталей кожуха, кронштейнов, скоб крепления и т.п.) связано с выбором формы элемента, материала изготовления и технологии его производства.

Целесообразен следующий порядок работ по обеспечению прочности и жесткости РЭС: 1) составление расчетной схемы блока (узла), выявление действующих сил и элементов конструкции, в которых напряжения и деформации могут достигать недопустимо больших значений; 2) выбор расчетных моделей для критических узлов; 3) расчет собственной частоты узлов и напряжений и сравнение их с допустимыми; 4) разработка мероприятий по обеспечению жесткости и прочности узлов. При определении расчетной схемы и расчетных моделей исходная информация представляется в виде таблицы.

Жесткость конструкции (или ее элементов) обеспечивается при собственной ее частоте (или элементов) выше действующей, что исключает работу в резонансном режиме.

Для увеличения жесткости платы могут быть приняты следующие меры: уменьшена длина и ширина, увеличена толщина; увеличено число точек крепления (в том числе за счет приклейивания), исключено ухудшение крепления за счет контрочки резьбовых соединений; использованы дополнительные упоры, накладки, выполняющие функции ребер жесткости (иногда эти функции выполняют теплоотводящие шины или шины питания, поставленные на ребро, заливка жесткими пенокомпаундами); замена материала платы (например, стеклотекстолита металлом или керамикой) /2/.

Для индивидуального или мелкосерийного производства используются материалы, пригодные для обработки на универсальном металлорежущем оборудовании (станки с ЧПУ), – алюминиевый сплав Д16, титановый сплав ВТ4 и др. Для массового производства используются материалы, пригодные для обработки высокопроизводительным способом штамповки (сталь 08kp, титан ВТ4 и ВТ5, алю-

миниевые сплавы АМг, АМц); шероховатость обрабатываемых поверхностей  $Ra=3.2\ldots1.6$  мкм, точность по квалитетам 6–9. Для литья под давлением используются магниевые сплавы (МЛ3, МЛ5, МЛ6, МА1, МА3, МА5), латуни (ЛС59-1Л, ЛН80-3Л), алюминиевые сплавы (АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ11, АЛ28, АЛ32), толщина стенок которых может быть доведена до 0.5 мм.

## 5. ЗАЩИТА РЭС ОТ АТМОСФЕРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

### 5.1. Влияние влаги на эффективность и качество конструкций РЭС

Источники и пути проникновения влаги в РЭС /2/. В процессе производства, хранения и эксплуатации РЭС могут подвергаться воздействию влаги, содержащейся в окружающем пространстве, внутренней среде гермоблоков материалах конструкции, а также в используемых при изготовлении РЭС материалах (электролитах, травителях, моющих средствах). Максимально возможные содержание влаги в воздухе зависит от температуры и давления. При нормальном давлении (750 мм.рт.ст.=0,1 МПа) зависимость содержания влаги в воздухе от температуры представлена на рис.19. При снижении температуры влажного воздуха ниже уровня, соответствующего максимальному содержанию влаги (точке росы), избыток влаги выпадает в виде конденсата (росы).

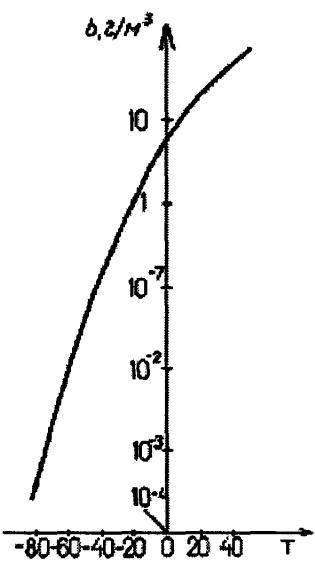


Рис.19. Зависимость содержания влаги в воздухе от температуры

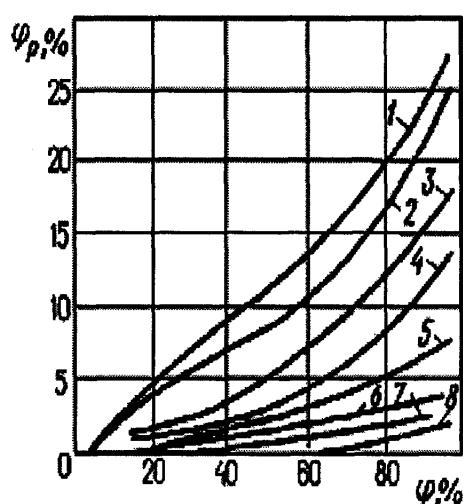


Рис.20. Зависимость равновесной влажности  $\phi_p$  различных волокнистых материалов от относительной влажности воздуха  $\phi$ :

- 1-вискозный шёлк; 2-натуральный шёлк; 3-хлопчатобумажное волокно; 4-ацетатный шёлк;
- 5-капрон; 6-поливинилхлоридное волокно; 7-полиэтилентерефталатное волокно; 8-полиэтиленовое волокно

Наличие влаги во внутренней среде гермокорпуса РЭС обусловлено следующими причинами:

- 1) проникновением её через микропоры из внешней среды;
- 2) невозможностью полной осушки (без влагопоглотителя) среды заполнения (например, точка росы газообразного азота после централизованной осушки составляет  $-70^{\circ}\text{C}$ );
- 3) наличием влаги в конструкционных материалах гермокорпуса.

Значительно увеличивают содержание влаги полимерные материалы использование которых в конструкции РЭС обусловлено экономическими соображениями (уменьшение трудоёмкости сборки, расходы материалов и энергии). Так, применение при сборке kleевых соединений позволяет: уменьшить трудоёмкость сборки на 20...30% благодаря исключению таких операций, как сверление, сварка, пайка, нарезание резьбы и т.д.; снизить требование шероховатости поверхности; увеличить допуски на геометрические размеры; повысить степень механизации и автоматизации технологических процессов. Полимерные материалы применяют для герметизации соединителей, контрвки резьбовых соединений, в качестве демпфирующих и виброизолирующих слоёв, для маркировки, выполнения неразъёмных соединений при сборке узлов из деталей и компонентов, изготовленных из различных материалов (металлов, сплавов, керамики, ферритов, рези, пластмасс и т.д.) и различного конструктивного исполнения (печатные платы и шлейфы, объёмные проводники, экраны, влагозащитные и теплоотводящие конструкции и т.д.). Полимеры входят в состав таких конструкционных материалов, как стеклотекстолит, гетинакс, лакоткань.

Все полимерные материалы гигроскопичны (рис. 20 , табл. 4).

Таблица 4

Влагопоглощение некоторых полимерных материалов и композиций

Материал	Влагопоглощение за 24 ч, %	Материал	Влагопоглощение за 24 ч, %
Фторопласт-4	0.0	Компаунды:	
Полиэтилен	0.01	КП-34	5.5
Полипропилен	0.01	КП-101	1.9
Эпоксидные компаунды	0.01...0.02	КТ-102	0.3
Лавсан	0.02	П-68	3.2
Полистирол	0.05	Эмали:	
Полихлорвиниловая пленка	0.02...0.04	ЭП-51	1.95
Пенополиуретаны	0.1...0.3	КО-918	0.0
Полиамиды	0.8	Слоистые пластинки:	
Лаки:		Гетинакс	2.9
МЛ-92	0.76	Стеклотекстолит	1.6...1.85
УР-231	1.0	Хлопок	5.0
КО-916К	0.0	Шёлк	15...20
Э-4100	0.9		

Материалы анизотропного строения поглощают влагу в разных направлениях с различной скоростью (дерево впитывает скорее вдоль волокон, слоистые пластинки – вдоль слоёв). Пористые (волокнистые) материалы более гигроскопичны, чем плотные материалы. В процессе производства и хранении полимер-

ные материалы поглощают влагу из окружающей среды, а при нагреве эта влага выделяется во внутреннюю среду гермокорпуса. Часто в конструкциях полимеры имеют вид тонких плёнок, испарение влаги, из которых может происходить лишь с торцевых поверхностей. Это обуславливает длительность процесса выделения влаги и накопления её во внутренней среде до концентрации, при которой могут происходить отказы РЭС. Используемые в технологическом процессе жидкие материалы также являются источником влаги и загрязнений, которые усиливают действия влаги. Так, электролиты, травители, моющие средства и другие материалы (глицерин, флюсы) нарушают структуру, создают полости для накопления влаги и вносят загрязнения. К таким же последствиям приводит механическая обработка (фрезерование, сверление) слоистых пластиков. Источниками влаги и загрязнения являются отпечатки пальцев и пыль; отрицательное воздействие может оказаться и неполная сушка после промывки компонентов и узлов.

*Взаимодействие влаги с материалами конструкций РЭС.* Механизм взаимодействия зависит от характера материала (органический, неорганический) и его способности поглощать (сорбировать) влагу или удерживать её на поверхность (адсорбировать). Поглощение влаги обусловлено тем, что материалы содержат поры, значительно большие размера молекула влаги, равного  $3 \cdot 10^{-10}$  м (межмолекулярные промежутки в полимерах –  $10^{-9}$  м, капилляры в целлюлозе –  $10^{-7}$  м, поры в керамике –  $10^{-5}$  м). Органические материалы поглощают воду через капилляры или путём диффузии. Неорганические взаимодействуют с влагой, конденсирующейся или адсорбируемой на поверхности. С металлами влага вступает в химическое взаимодействие, вызывающее коррозию; она также может проникать через поры и капилляры. Действие влаги усиливается при контакте металлов с сильно отличающимися электрохимическими потенциалами, а также в местах сварных швов, содержащих интерметаллические соединения. Вода (сконденсированная влага) – полярное, химически активное вещество, легко вступающее в соединение с различными металлами и неметаллами (газами, жидкостями, твёрдыми веществами, инертными газами). При этом образуются гидраты, устойчивые при низких температурах. Ещё более активно вода окисляется кислородом; она реагирует с фтором, хлором, соединениями углерода. Щелочные и щелочноземельные металлы разлагают воду уже при комнатной температуре. Вода является активным катализатором. Она обладает высокими диэлектрической проницаемостью в жидкой фазе ( $\epsilon=79\ldots84$ ) и потерями ( $tg\delta$ ): при частоте  $f=50$  Гц  $tg\delta$  весьма велик; при  $f=10^5$  Гц  $tg\delta=1.6$ ; при  $f=10^7$  Гц  $tg\delta=0.3$ ; при  $f=10^9$  Гц  $tg\delta=0.03$ . При наличии примесей ионного типа вода имеет высокую проводимость (удельное сопротивление водопроводной воды составляет  $10^6\ldots10^7$  Ом·м; дважды дистиллированной на воздухе воды –  $10^8$  Ом·м; перегнанной в вакууме –  $10^{10}$  Ом·м).

Воздействие влаги на материалы и компоненты может привести к постепенным и внезапным отказам РЭС. Увлажнение органических материалов сопровождается следующими явлениями: увеличением диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) и потерь ( $tg\delta$ ); уменьшением объёмного сопротивления, электрической и механической прочности; изменением геометрических размеров и формы (короблением при удалении влаги после набухания); изменением свойств смазок. Это приводит к увеличению ёмкости (в том числе паразитной), уменьшению доброт-

ности контуров, снижению пробивного напряжения и появлению отказов РЭС. Постепенные отказы систем радиолокации и навигации проявляются в ухудшении точности определения координат и снижении дальности действия РЛС. У радиовещательных и телевизионных приёмников снижается чувствительность и избирательность, сужаются диапазоны рабочих частот (в сторону более низких) появляется неустойчивость работы гетеродина.

Внезапные отказы обуславливаются электрическим пробоем, расслоением диэлектриков и т. д. При увлажнении металлов отказы могут произойти из-за коррозии, приводящей к нарушению паяных и сварных герметизирующих швов, обрыву электромонтажных связей, увеличению сопротивления контактных пар (что ведёт к увеличению шумов неразъёмных и обгоранию разъёмных контактов); уменьшению прочности и затруднению разборки крепежа; потускнению отражающих и разрушению защитных покрытий; увеличению износа трущихся поверхностей и т. д.

При температуре ниже точки росы представляет опасность сконденсированная влага. Наличие влаги на поверхности прозрачных окон (например, телевизионных передающих трубок на ПЗС-структурах) приводит к смазыванию изображения. Попадание влаги на поверхность тонкоплёночных резистивных элементов может привести к изменению их сопротивления (уменьшению при шунтировании влагой, увеличению при коррозии); влага в диэлектриках плёночных конденсаторов увеличивает их ёмкость и приводит к пробою диэлектрика; влага на поверхности полупроводниковых элементов ИС способствует скоплению на границе  $Si-SiO_2$  положительных ионов ( $Na^+$  и др.), образованию слоя накопленных зарядов в полупроводнике под влиянием поверхностных ионов и изменению параметров полупроводниковых приборов (дрейфу обратных токов, пробивных напряжений, коэффициента усиления биполярных транзисторов, порогового напряжения и крутизны передаточной характеристики МДП-транзисторов).

При замерзании сконденсированной влаги и электрохимической коррозии может нарушиться механическая прочность паяных и сварных герметизирующих швов, произойти расслоение многослойных печатных плат, обрыв печатных проводников при их отслаивании от подложки, появление трещин в подложках гибридных ИС.

Всё это, как правило, приводит к полному отказу РЭС, как негерметичных, так и герметичных, но в первом случае воздействие оказывает внешняя среда, а во втором – и внутренняя.

*Способы влагозащиты РЭС.* Для обеспечения надёжности функционирования РЭС при воздействии влаги требуется применять влагозащитные конструкции, которые разделяют на две группы: монолитные и полые. Монолитные оболочки составляют неразрывное целое с защищаемым узлом. От конструкции влагозащиты зависят такие параметры РЭС, как масса, габариты, стоимость, надёжность; удобство ремонта, обслуживания, изготовления; возможность механизации и автоматизации производства. Сложность создания конструкции влагозащитной оболочки состоит также в том, что на неё часто возлагаются функции несущей конструкции, теплоотвода, защиты от электромагнитных воздействий и ионизирующих излучений, пыли, света, микроорганизмов.

Монолитные плёночные оболочки используются в основном как технологическая защита бескорпусных компонентов, подлежащих герметизации в составе блока, а также компонентов с улучшенными частотными свойствами (за счёт уменьшения паразитных параметров внешних выводов). Монолитные оболочки из органических материалов, выполняющие функции несущих конструкций, изготавливают методами опрессовки, пропитки, обволакивания, заливки. Обычно компоненты с такой защитой предназначены для использования в негерметичных наземных РЭС, и в этом случае приходится принимать дополнительные меры для обеспечения влагозащиты электрических соединений (например, лакировать печатные платы).

Полые влагозащитные оболочки позволяют освободить защищаемые компоненты от механического контакта с оболочкой, что обеспечивает работу в более широком диапазоне температур и исключает химическое взаимодействие оболочки и защищаемого компонента.

Полые оболочки, особенно из неорганических материалов, обеспечивают более высокую надёжность влагозащиты, но имеют значительные габариты, массу, стоимость. Наиболее эффективно использование полых оболочек для групповой герметизации бескорпусных компонентов в составе блока. Это объясняется уменьшением длины герметизирующего шва (по сравнению с индивидуальной герметизацией компонентов), а также возможностью создания внутри гермоблоков при заполнении контролируемой по влажности и химическому составу инертной среды. Однако стоимость таких оболочек высокая, а ремонтопригодность – низкая, поэтому они находят применение в основном для бортовой и СВЧ-аппаратуры.

## **5.2. Защита от влаги элементов и узлов РЭС монолитными оболочками**

Монолитные оболочки используются для защиты элементов и узлов от влаги на этапе изготовления и сборки (плёночные оболочки) или для защиты их при эксплуатации (толстостенные оболочки). Плёночная защита не может служить конструктивной основой для крепления внешних выводов, а является лишь технологической защитой компонентов (см. рис. 21) до герметизации их в монолитных (полых) оболочках или до сборки в узлы с общей герметизацией. Плёночные оболочки выполняются из органических и неорганических материалов и имеют толщину (для различных способов защиты от влаги) 0.2...20 мкм.

К материалам защитных плёнок (рис. 21) предъявляется ряд требований: хорошие влагозащитные свойства (малая влагопроницаемость, отсутствие пор, пассивирующие свойства), возможность работы в диапазоне температур (близость ТКЛР плёнки и материала компонента, эластичность), хорошая адгезия к защищемому компоненту.

Одновременно всем свойствам не отвечает ни один из материалов, поэтому в каждом конкретном случае выбирается тот или иной вариант плёночной защиты. ТКЛР плёнок  $SiO_2$  значительно отличается от ТКЛР кремния. Поэтому плёнки  $SiO_2$  плохо работают в широком диапазоне температур и при большой толщине. Для усиления их защитных свойств используется дублирование плёнками силанов  $Si_3N_4$ , которые имеют высокую адгезию и термостойкость.

Гидрофобные плёнки имеют способность к водоотталкиванию, но их температурная стойкость не превышает 250°C и они неустойчивы при длительном воздействии влаги. Плёнки из эластичных лаков (МК-4У, КО-961п, ПЭ-518 и др.) хорошо защищают от влаги, но трудно контролировать толщину и равномерность плёнки. В ряде случаев для защиты полупроводниковых компонентов можно использовать плёнки из стекла. При выборе стекла того или иного химического состава необходимо, чтобы ТКЛР стекла и защищаемого компонента были близки, а также учитывать температуростойкость стекла (в случае установки кристалла в корпус с использованием эвтектики  $Al-Si$  нагрев превышает 577°C).

Для защиты от влаги компонентов и узлов с помощью монолитных оболочек, являющихся одновременно несущей конструкцией для внешних выводов, используются пропитка, заливка, обволакивание и опрессовка.

Пропитка нашла наибольшее применение для защиты от влаги обмоток электродвигателей, катушек трансформаторов и т. д. При пропитке из полостей и пор вытесняется воздух и они заполняются лаком или компаундом. Это приводит к увеличению электрической и механической прочности, улучшению теплопроводности, но одновременно увеличиваются масса, паразитная ёмкость, интенсифицируются химические и электрохимические процессы в местах пайки или сварки внешних выводов. В конструкциях изделий предназначенных для пропитки, должна быть предусмотрена возможность свободного выхода воздуха и заполнением пор пропиточным составом (например, в «щечках» катушек трансформаторов делаются вырезы). Выбор пропиточного состава определяется требованиями, которые являются наиболее важными для данного изделия (проникающая способность, химическая нейтральность, цементирующая способность, электрическая прочность изоляции, высокая адгезия, теплопроводность, значения  $\varepsilon$  и  $tg\delta$ , холодо- и термостойкость).

Заливка – это сплошная упаковка компонента или узла в изоляционную массу путём заполнения ею свободного промежутка между изделием и стенками корпуса или между изделием и заливочной формой (рис. 22). Материал формы в последнем случае выбирают такой (например, фторопласт), чтобы он обеспечивал минимальную адгезию заливочного материала; иногда стенки формы покрывают смазкой. Заливка пенопластом позволяет значительно увеличить механическую прочность узла при минимальном увеличении массы, но теплоотвод (без теплоотводящих шин) резко ухудшается. Толщина стенок влагозащитной конструкции выбирается из соображений получения требуемого времени влагозащиты. Для улучшения теплопроводности в заливочный компаунд иногда добавляют кварцевую пудру или прокалёный порошок оксида алюминия, а для улучшения влагозащитных свойств можно добавлять порошок цеолита, поглощающего влагу.

Расчётное время ( $\tau$ ) защиты оболочки (без цеолита) можно определить по формуле

$$\tau = - \frac{4 d^2}{\pi^2 D} \ln \left[ \frac{\pi^2}{8} \left( 1 - \frac{P_{kp}}{P_0} \right) \right], \quad (48)$$

где  $d$  – толщина оболочки, м;  $D$  – коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ; – давление паров окружающей среды;  $p_{kp}$  – давление паров влаги, соответствующее ее критической концентрации, после достижения которой появляются отказы.

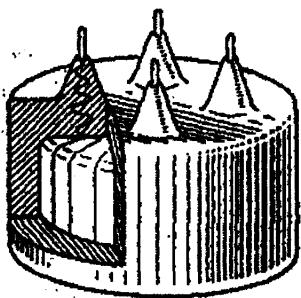


Рис. 22. Защита тороидального трансформатора от влаги заливкой

Расчетное время влагозащиты не является определяющим при выборе материала, так как надо оценить внутренние напряжения после полимеризации и в диапазоне температур, адгезию оболочки к компоненту,  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg}\delta$ , электрическую и механическую прочность, теплопроводность, токсичность и т. д.

При выборе заливочного материала особое внимание следует обращать на близость ТКЛР материала заливки и защищаемого компонента или узла (это влияет на внутренние напряжения в компаунде), а также ТКЛР материала заливки и внешних выводов (это влияет на образование каналов проникновения влаги при изменение температуры). Для защиты заливаемых элементов от механических нагрузок, возникающих в результате внутренних напряжений в компаунде, принимают следующие меры: ограничивают толщину заливки; наиболее чувствительные компоненты располагают ближе к центру; отдельные компоненты, например магнитные, помещают в защитные каркасы; перед заливкой защищаемые компоненты покрывают тонким слоем эластичного компаунда (например, СКТН), вазелина (КВ-3, КВ-Н и др.), смазки (ВНИИНП, ЦИАТИМ-201 и др.). Смазка толщиной 0.025; 0.062; 0.087 мм снижает контактное давление на 30, 70 и 80% соответственно. Увеличивать толщину слоя смазки для изделий, работающих в широком диапазоне температур, нецелесообразно из-за высокого значения ТКЛР силиконовых материалов (около  $200 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) и возникающего вследствие этого большого гидростатического давления в замкнутом объеме.

Применяют различные компаунды: эпоксидные (ЭЗК, ЭК-16Б, Э-242 и др.), эластичные полиуретановые для заливки ферритовых элементов (типа 10-10, 10-20 и др.), кремнийорганические (Виксингт, Сиэл и др.), полиэфирные (МБК) и др. Особое место занимают пенокомпаунды, имеющие малые плотность (10...300  $\text{кг}/\text{м}^3$ ), диэлектрическую проницаемость ( $\varepsilon=1.05\dots2.1$ ) и потери ( $\operatorname{tg}\delta=0.002\dots0.03$ ). Они выполняются на основе фенолформальдегидной смолы (ФК-20), полиуретанов (ПУ-101 и др.), эпоксидной смолы (ПЭ-1, ПЭ-5 и др.), кремнийорганических материалов (ВПГ, СИЛПЕН, К-40 и др.). Пенокомпаунды последней группы обладают демпфирующими свойствами, работают в диапазоне температур  $-60\dots+250^{\circ}\text{C}$ .

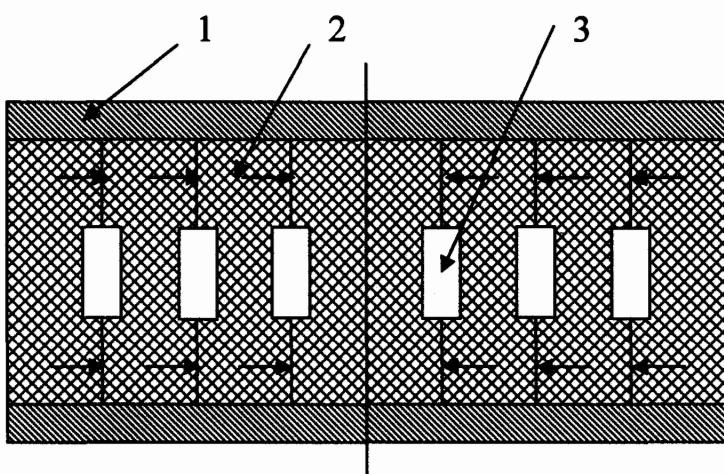


Рис. 23. Тангенциальные силы в герметизированном блоке с навесными компонентами:  
1-плата; 2-компаунд; 3-компонент

Жесткие пенокомпаунды обладают высокой удельной механической прочностью, что позволяет использовать их в качестве конструкционных материалов. Чтобы уменьшить механические нагрузки на залитые жестким компаундом компоненты, в качестве демпфера часто используют слой эластичного пенокомпаунда толщиной 1...3 мм (ВГО-1, СИЛПЕН, У-1-18 и др.). После заливки пенокомпаундами повышается вибропрочность узла вследствие смещения резонансных частот. При использовании жёстких пенокомпаундов (ПУ-101 и др.) допускается эксплуатация изделий при температурах от  $-25\ldots60$  до  $+40\ldots150^{\circ}\text{C}$ , эластичных (например, ВПГ) – в диапазоне температур от  $-60$  до  $+250^{\circ}\text{C}$ , пеностекла – до  $1000^{\circ}\text{C}$ .

Обволакивание применяют для защиты от влаги печатных плат, дискретных ЭРЭ, бескорпусных полупроводниковых приборов, микросборок. Основным преимуществом обволакивания является высокая экономичность, недостатками – довольно толстый и неконтролируемый слой покрытия, возможность использования только для жёстких условий эксплуатации (как и для всех видов полимерной защиты от влаги), сложность удаления попавшей под защитный слой влаги. Обволакивание печатных плат лаками и компаундами позволяет повысить пробивное напряжение работающей в наземных условиях аппаратуры. Для обволакивания применяют лаки (УР-231, Э-4100 и др.), компаунды (ЭКМ. ЭК-42 и др.), эмали. К обволакиванию можно отнести также герметизацию компаундами паяных и сварных швов и мест контактирования металлов с различными электрохимическими потенциалами, которые весьма чувствительны к воздействию влаги. Но даже при наличии герметизирующих компаундов следует избегать контакта металлов с сильно различающимися электрохимическими потенциалами, например алюминия ( $-667$  мВ) и меди ( $+10$  мВ), находящихся в морской воде (рН 7.5).

Опрессовка – это защита изделия от влаги толстым слоем полимерного материала (термореактивная или термопластичная пластмасса) методом, литьевого или трансферного прессования в специальных формах. Этот вид влагозащиты используют в основном для малогабаритных компонентов (ИС, ЭРЭ, микросборок; см. рис. 24, 25, 26), что позволяет укрепить внешние выводы и создать несущую

конструкцию, которая способна выдерживать и пригодна для автоматизации установки компонентов на плату.

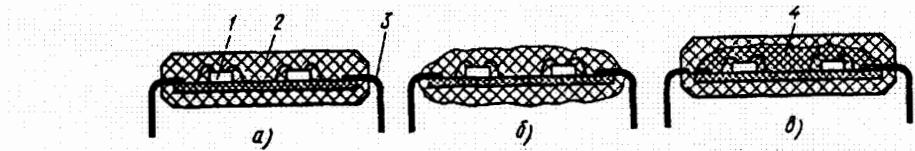


Рис. 24 Монолитные влагозащитные конструкции узлов РЭС:  
а – заливка в форму без подслоя; б – обволакивание;  
в – двухслойная заливка с подслоем из эластичного материала;  
1 – элементы; 2 – герметизирующий полимерный материал;  
3 – выводы; 4 – подслой из эластичного материала

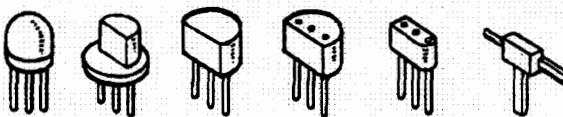


Рис. 25. Транзисторы в монолитных полимерных корпусах различной конструкции

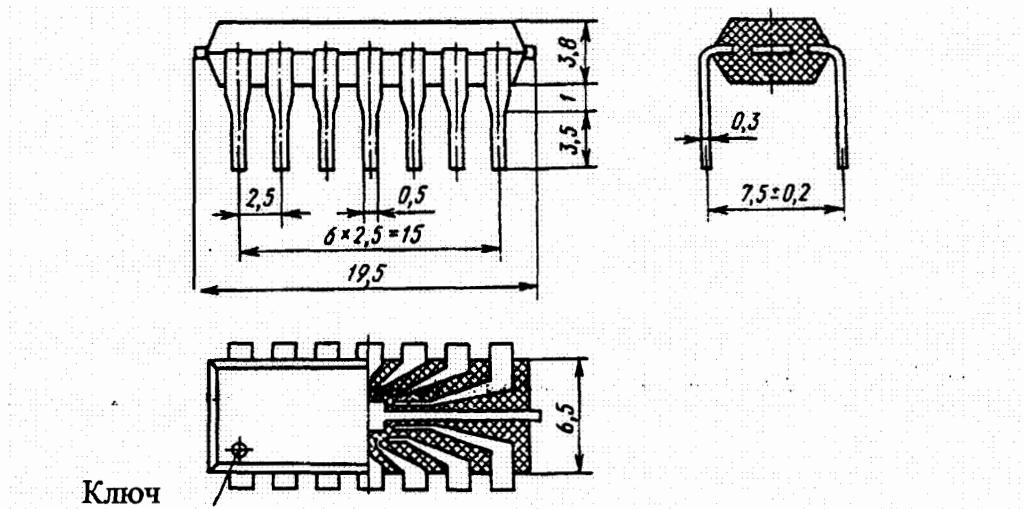


Рис.26. Монолитный полимерный корпус ИС типа 201.14-1

Используется для нежестких условий эксплуатации (отапливаемые помещения), имеет низкую стоимость (в 2–3 раза ниже стоимости полых корпусов). При разработке конструкции учитывается необходимость использования материалов корпуса и выводов с близкими значениями ТКЛР. Толщина опрессовки выбирается с учетом надежности влагозащиты, технологических требований (при толщине стенки менее 2 мм возможно повреждение защищаемого компонента в пресс-форме), внутренних повреждений (при больших толщинах и изменении температуры могут возникнуть большие внутренние напряжения). При выборе материала для опрессовки необходимо учитывать его параметры  $\epsilon$ ,  $\operatorname{tg}\delta$ , электрическую прочность.

Время влагозащиты рассчитывается по той же формуле, что и для заливки. Для компонентов СВЧ этот вид влагозащиты не используется. Защита полимерными материалами от влаги экономична, но используется только для нежестких условий эксплуатации (отапливаемые помещения). Применяя гермокорпус, можно создать более надёжную влагозащиту компонентов, при этом в ряде случаев целесообразно переходить на бескорпусную элементную базу.

Для защиты от коррозии несущих корпусных конструкционных узлов из металлов и сплавов широко применяют монолитные плёночные металлические покрытия, нанесённые горячим способом гальванически, путем диффузии. Толщина таких покрытий единицы – десятки микрометров. Из приведенных в табл.5 металлических покрытий наибольшей температурой стабильностью обладает хромовое (тускнеет при +500 °С). Золотое покрытие не взаимодействует с кислотными, щелочными и сернистыми соединениями, но оно мягкое и легко поддаётся истиранию.

Таблица 5

## Характеристики некоторых металлических антакоррозионных покрытий

Покрытие	Назначение и область применения покрытия	Материал защищаемых деталей	Толщина покрытия, мкм
Цинковое	Защита от коррозии корпусов, крышек, панелей, шасси, каркасов, резьбовых крепежей деталей, получение светопоглощающих поверхностей	Сталь, медь, медные сплавы	6...30
Кадмиеевое	Защита от коррозии в морских условиях корпусов, крышек, каркасов, панелей, шасси, экранов и т.д.	То же	12...30
Никелевое	Защита от коррозии экранов, сердечников, корпусов, резьбовых крепёжных деталей; придание деталям повышенной отражательной способности; увеличение твёрдости деталей, работающих на трение	»	3...18
Хромовое (с подслоем)	Защита от коррозии и декоративная отделка корпусов, ручек, петель и т.п., увеличение твёрдости деталей, работающих на трение (оси, втулки, стержни)	»	9...48, для листа 6...12
Сплав олово–свинец	Улучшение условий пайки контактов, лепестков, проводов	»	6...24
Серебряное (с подслоем)	Улучшение электропроводности и защита от коррозии контактов, пружин, лепестков, резьбовых крепёжных деталей, улучшение пайки	Сталь, медь, медные сплавы, алюминий и его сплавы, ковар	6...60, для листа 3...6
Золотое (с подслоем)	Уменьшение переходных сопротивлений контактов, пружин, лепестков, создание покрытия, не имеющего оксидной плёнки	Медь, медные сплавы, ковар	9...12 (серебро 6...9, золото 3)

В ряде случаев защитное покрытие делают многослойным, например слой меди толщиной 6...10 мкм (высокая адгезия к стали), слой никеля толщиной 3...6 мкм (высокая твёрдость), слой хрома толщиной 0.5 мкм (антифрикционность, гидрофобность). Для защиты корпусов из алюминиевых сплавов используют многослойные покрытия, например  $Cu-Ni-(Sn-Bi)$ . Добавка висмута позволяет избежать оловянной чумы при низких температурах и препятствует росту дендритов при нанесении покрытия.

В зависимости от поляризуемости пленки металла различают два вида покрытий: катодные и анодные. Если электродный потенциал металла покрытий в данной среде (табл. 6) более положительный, чем электродный потенциал основного металла, то покрытие называется катодным, а если он более отрицательный, то покрытие называется анодным. Катодные покрытия защищают основной металл лишь механически, изолируя его от внешней среды. Анодные покрытия защищают его не только механически, но и электрохимически. Продукты разрушения заполняют поры, и процесс разрушения замедляется.

Таблица 6

### Электрохимические потенциалы металлов

Металл	Электрохимический потенциал, мВ	Металл	Электрохимический потенциал, мВ
Пресная вода, pH 6			Морская вода, pH 7,5
Серебро	+194	Серебро	+149
Медь	+140	Никель	+46
Никель	+118	Медь	+10
Алюминий	-169	Свинец	-259
Олово	-175	Цинк	-284
Свинец	-283	Сталь	-335
Сталь	-350	Кадмий	-519
Кадмий	-574	Алюминий	-667
Цинк	-823	Олово	-809

В конструкторской документации на изделие указывается материал покрытия, его толщина, последовательность нанесения слоёв. Например, медно-никелево-хромовое покрытие, служащее защитой от коррозии и одновременно являющееся декоративной отделкой, обозначается М24Н12Х (толщина меди 24 мкм, никеля 12 мкм, хрома до 1 мкм). В ряде случаев несущие конструкции защищают от влаги с помощью лакокрасочных покрытий. Такие покрытия вследствие химической инертности (лучшими антикоррозионными свойствами, чем металлические, но механическая прочность и влагостойкость их меньше. Перед нанесением лакокрасочных покрытий металл для улучшения адгезии грунтуют.

### 5.3. Защита от влаги элементов и узлов РЭС полыми оболочками

Применение полых влагозащитных оболочек. Полые влагозащитные оболочки применяют для защиты компонентов и узлов РЭС (ИС, микросборок), в качестве дополнительной защиты от влаги наземных РЭС на корпусированных элементах, для бортовых РЭС на бескорпусных элементах, для аппаратуры диапазона

**СВЧ.** Применение полых оболочек позволяет исключить механический контакт их с защищаемым изделием, что позволяет исключить передачу изделию механических напряжений, которые могут возникнуть в них. Кроме того, устраняется химическое взаимодействие оболочки с защищаемым изделием. Одновременно часто улучшается теплоотвод, повышается надёжность влагозащиты и обеспечивается электромагнитное экранирование, ослабляются паразитные связи ввиду уменьшения диэлектрической проницаемости при замене полимера воздухом.

Следует также отметить, что применение полых герметичных оболочек позволяет решить проблему возникающую при эксплуатации бортовых РЭС. Для них особое значение имеет изменение атмосферного давления с изменением высоты. Снижение атмосферного давления с увеличением высоты приводит к снижению пробивного напряжения, появлению коронных разрядов и, как следствие, увеличению при наличии влаги химической коррозии, причиной которой являются возникающие при разряде озон и азотистые соединения. Минимум электрической прочности отмечается на высоте 22000-24000 м.

## 6. ДЕЙСТВИЕ ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ НА РЭС

### 6.1. Ионизирующая радиация и ее воздействие на вещество

Ионизирующей радиацией называют излучение, обладающее свойством проникать в толщу вещества и вызывать в нем ионизацию. /10/

Различают несколько видов ионизирующей радиации, отличающейся по составу образующих ее элементарных частиц. При рассмотрении воздействия радиации применяют следующие термины для основных характеристик радиации: мощность потока и интегральный поток (при корпускулярном излучении) и мощность дозы облучения и доза облучения (при гамма-излучении).

Мощность потока измеряется количеством частиц, падающих перпендикулярно на площадку в  $1\text{см}^2$  за секунду.

Интегральный поток – полный поток частиц, прошедших через площадку  $d$   $1\text{ см}^2$  за время облучения.

Мощность дозы измеряется в рентгенах в секунду (Р/с), доза облучения – в рентгенах.

Рентген (Р) – доза гамма-излучения, при поглощении которого в  $1\text{ см}^3$  сухого воздуха при температуре  $0^\circ\text{C}$  и нормальном давлении образуются положительные и отрицательные заряды общей величиной в одну электростатическую единицу каждого знака.

При дозе 1 Р в одном грамме воздуха поглощается энергия  $83 \cdot 10^{-7}$  Дж.

Воздействие радиации на вещество зависит от вида радиации, дозы (потока) облучения, мощности дозы (потока) облучения, распределения энергии радиации по спектру, природы облучаемого вещества, окружающих условий (температуры, влажности и др.).

Облучение быстрыми нейтронами носит объемный характер /10/ и вызывает нарушение структуры вещества (смещение атомов в кристаллической решетке), образование примесей других элементов и, в частности, образование радиоактив-

ных изотопов; ионизацию (в небольшой степени) вследствие выделения из атомов заряженных частиц.

Облучение быстрыми протонами является поверхностным и вызывает ионизацию и нарушение структуры вещества (в небольшой степени).

Воздействие гамма-лучей также имеет объемный характер. Под влиянием гамма-излучения возникают сильная ионизация, явление фотопроводимости, центры окраски, люминесценция, вторичное рентгеновское и гамма-излучения, химические реакции, повышение температуры, изменение анизотропии свойств кристаллических веществ.

Облучение электронами носит поверхностный характер и вызывает ионизацию, вторичную эмиссию, небольшие изменения в решетке вещества, жесткое рентгеновское излучение.

Воздействие  $\alpha$ -частиц и осколков ядер можно практически не учитывать вследствие малой длины пробега и поверхностного характера.

Воздействие излучений может вызвать обратимые, необратимые или полупостоянные изменения в веществе.

Обратимые изменения возникают одновременно с началом облучения, сохраняются в период облучения и исчезают с прекращением облучения. Необратимые изменения наступают под воздействием определенной дозы облучения, не исчезают и не уменьшаются после прекращения облучения. Полупостоянные изменения начинаются при облучении, развиваются по мере увеличения дозы и исчезают через некоторое время после окончания облучения.

## 6.2. Влияние облучения на конструкционные материалы

**Металлы.** На металлические конструкции ионизирующие излучения влияют мало. На свойства металлов оказывают влияние только нейтронные потоки большой интенсивности, более  $10^{20}$  нейтр/см<sup>2</sup>. При бомбардировке нейtronами может, например, увеличиться прочность на разрыв, измениться текучесть и эластичность, повыситься удельное сопротивление (на 10—20%) /11/. В месте контакта металлов с органическими материалами возможно образование металлоорганических соединений.

**Органические материалы.** Эти материалы весьма чувствительны к радиации. Воздействие последней приводит к преобразованию молекул в этих материалах, сопровождающемуся химическими реакциями, вызывающими необратимые изменения природы вещества и его механических свойств. Преобразование сопровождается выделением газов, которые в соединении с влагой образуют кислоты, оказывающие вредное воздействие на изоляционные материалы. Изменение электрических свойств органических веществ (проводимость, диэлектрическая проницаемость, угол потерь) при облучении носит обратимый характер. Время восстановления зависит от природы материала и условий облучения.

**Неорганические материалы.** На неорганические материалы радиация действует меньше, чем на органические. При облучении нейtronами возможно объемное расширение (1% при облучении потоком  $10^{20}$  нейтр/см<sup>2</sup>).

Характеристики радиационной стойкости некоторых органических и неорганических материалов приведены в таблице 7.

Таблица 7

## Характеристики радиационной стойкости материалов

Материал	Допустимый поток нейтронного облучения, нейтр/см <sup>2</sup>	Допустимая доза гамма-облучения, Р
<b>Материалы с низкой радиационной стойкостью</b>		
Ацетатцеллюлоза (бумага)	$3 \cdot 10^{14}$ – $2 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^6$ – $4 \cdot 10^7$
Органическое стекло	$10^{14}$ – $10^{15}$	$10^{15}$
Фенольные смолы(без наполнителя)	$7 \cdot 10^{14}$	$10^7$
Полиамиды разные	$4 \cdot 10^{14}$	$7 \cdot 10^6$
Поливинилхлорид	$10^{15}$	$10^6$
Полиэтилен-терефталат	$10^{15}$	$10^7$
Кремнийорганическое стекло	$7 \cdot 10^{13}$ – $3 \cdot 10^{14}$	$(1\text{--}5) \cdot 10^6$
<b>Материалы со средней радиационной стойкостью</b>		
Фенольные смолы с органическим наполнителем	$10^{16}$	$10^8$
Полиэтилен	$10^{17}$	$10^8$
Стеклоткань	$10^{16}$	$10^8$
Эпоксидные лаки	–	$(5\text{--}10}) \cdot 10^8$
Нитролак	–	$(5\text{--}7}) \cdot 10^8$
<b>Материалы с высокой радиационной стойкостью</b>		
Керамика (стеатит)	$3 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{12}$
Стекло	$10^{18}$	$3 \cdot 10^9$
Кварц	$10^{19}$	$10^{10}$
Микалекс	$10^{19}$	$10^{11}$
Слюдя	$10^{18}$	$10^{10}$
Полистирол	$1 \cdot 3 \cdot 10^{19}$	$5 \cdot 10^9$

**Примечание.** Под допустимой дозой (потоком) понимается величина, при которой характеристики материала ухудшаются на 25%; допустимая доза определяется при мощности потока нейтронов и мощности дозы гамма-облучения соответственно  $10^{11}$ – $10^{12}$  нейтр/(см<sup>2</sup>с) и  $(10^6$ – $10^7$ ) Р/ч.

### 6.3. Влияние ионизирующего облучения на резисторы

Следствием воздействия радиации может быть пробой в связующих и пропитывающих изоляцию материалах; изменение свойств основного материала резистора, появление проводимости из-за ионизации материала каркаса и покрытия /12/.

Величина и знак изменения сопротивления резистора определяется основным материалом резистора, номинальной величиной приложенного напряжения и особенностями технологии изготовления. Чем больше величина сопротивления,

тем большие обратимые изменения вызываются облучением; поэтому резисторы с сопротивлением порядка  $10^9$  Ом могут быть ненадежны.

Облучение резисторов потоком быстрых нейтронов вызывает как необратимые, так и обратимые изменения (в зависимости от величины потока) (табл. 8, 9), а гамма-облучение – только обратимые изменения.

Таблица 8

Изменение нормального сопротивления резисторов, %,  
при кратковременном воздействии нейтронного облучения

Тип резисторов	Обратимые изменения		Необратимые изменения	
	Величина потока, нейтр/см <sup>2</sup>			
	$10^7$	$10^9$	$10^{16}$	$10^{18}$
Углеродистые композиционные:				
постоянные	–(2–8)	–(4–10)	0÷9	0÷11
переменные	–	–	–	–
Углеродистые пленочные:				
постоянные	–1÷+2	–2÷+3	–0.2÷+1.5	–0.8÷+2
переменные	–	–	–	–
Металлопленочные	0÷+1	0÷+2	0÷+0.4	0÷+0.6
Проволочные	0÷+0.5	0÷+1.2	0÷+0.2	0÷+0.4
Проволочные и ленточные переменные	–	–	–	–

Таблица 9

Величины нейтронного потока, при которых возникают необратимые изменения в резисторах и короткие замыкания, нейтр/см<sup>2</sup>

Тип резисторов	Начало изменений	Короткие замыкания
Углеродистые композиционные:		
постоянные	$10^{13}$	$10^{19}$
переменные	$10^{13}$	$10^{19}$
Углеродистые пленочные:		
постоянные	$10^{13}$	$10^9$
переменные	$10^{13}$	$10^{19}$
Проволочные	$10^{19}$	$10^{20}$
Проволочные и ленточные переменные	$10^{19}$	$10^{20}$

Зависимость сопротивления тонкопленочных и проволочных резисторов от длительности гамма-облучения показана на рис 27.

Импульсное (длительность импульса 0.1 мс) гамма-облучение дозой  $10^3$  Р при мощности дозы  $10^7$  Р/с в резисторах различных номиналов вызывает обратимые изменения (табл.10).

Таблица 10

Номинал, кОм	Уменьшение величины сопротивления во время облучения, %
1	1
10	0.5–4
100	5–15
1000	30–75
10000	65–85

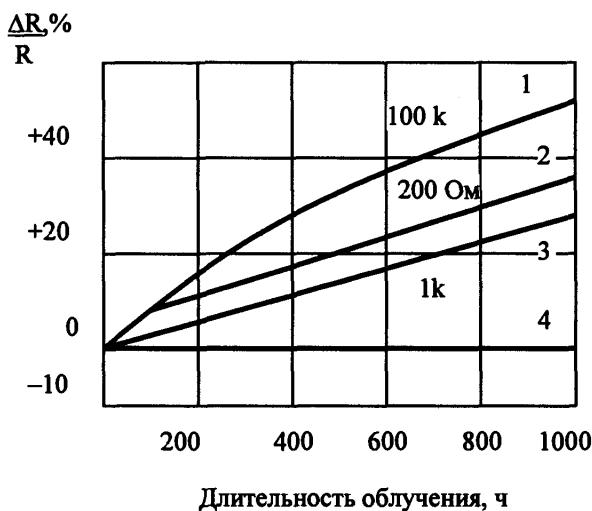


Рис. 27. Зависимость изменения сопротивления тонкопленочных (1–3) и проволочных (4) резисторов различных номиналов от длительности гамма-облучения при общей дозе  $2 \cdot 10^9$  Р.

При малых дозах импульсного нейтронного и гамма-облучения, действующих одновременно, изменения параметров резисторов разных типов носят обратимый характер (величина изменения определяется не конструкцией, а размерами резистора). Характеристики резисторов полностью восстанавливаются через 1–5 мс после облучения.

#### 6.4. Влияние ионизирующего облучения на конденсаторы

Ионизирующее излучение вызывает обратимое или необратимое изменение емкости конденсаторов и обратимое (в большинстве случаев) изменение величины утечки и тангенса угла потерь.

Нейтронная радиация приводит к необратимым и обратимым изменениям характеристик конденсаторов, а гамма-облучение в основном – к обратимым изменениям. Общей причиной этого является изменение электрических характеристик диэлектрика (диэлектрической постоянной и сопротивления).

Кроме этого, при воздействии радиации происходит выделение газов в электролитических конденсаторах и конденсаторах с масляным заполнением, что может привести к их разрушению. Данные, характеризующие радиационную стойкость конденсаторов различных видов, даны в таблице 11.

Таблица 11

## Влияние радиации на конденсаторы

Вид конденсаторов	Интенсивность суммарного нейтронного $\gamma$ -излучения, (нейтр/см $^2$ ) + эрг/Кл	Характер влияния радиации
Керамические	$1.3 \cdot 10^8 + 2.5 \cdot 10^{10}$	Обратимые изменения емкости на 4–19%
Сегнетокерамические емкостью 0.01–0.08 мкФ	$1 \cdot 10^{13} + 8 \cdot 10^4$	Токи утечки в обратном направлении. Обратимые изменения емкости менее 1%
Стеклоэмалевые	$2.5 \cdot 10^{17} + 6.1 \cdot 10^{10}$	Уменьшение сопротивления изоляции на 2–3 порядка
Слюдяные	$1 \cdot 10^{14} + 5.7 \cdot 10^8$	Необратимое изменение емкости менее 1%
	$1.2 \cdot 10^{18} + 0$	Обратимое изменение емкости менее 1%
Бумажные	$1 \cdot 10^{18} + 2.5 \cdot 10^{10}$	Значение емкости выходит за пределы допусков
Бумагомасляные	—	Необратимые изменения емкости от +37 до –20%.
Электролитические	$1.1 \cdot 10^{18} + 0$	Ток утечки возрастает с повышением мощности и дозы облучения
Танталовые	$(3.4 \cdot 10^{12} \dots 2.5 \cdot 10^{18}) + (5.7 \cdot 10^8 \dots 4.4 \cdot 10^{10})$	Необратимые изменения емкости от –10 до +3%
Алюминиевые	То же	Необратимые изменения емкости от –6 до +65%
	$1 \cdot 10^{16} + 0$	Короткое замыкание

**Примечание.** Сегнетокерамические конденсаторы подвергались импульсному облучению, остальные – непрерывному.

### 6.5. Влияние радиации на полупроводниковые приборы

Характер и степень воздействия радиации на полупроводниковый диод зависят от того, какой эффект использован в качестве основы его работы, вида полупроводникового материала, удельного сопротивления материала, а также конструктивных особенностей диода.

**Германиевые диоды.** В результате воздействия нейтронного облучения проводимость диодов в обратном направлении увеличивается, а в прямом – уменьшается.

Германиевые диоды выходят из строя при потоках более  $10^{13}$  нейтр/см $^2$ . Заметное изменение характеристик начинается при нейтронном облучении с интенсивностью  $10^{11}$  нейтр/см $^2$ . При таких условиях облучения германиевые диоды мо-

гут работать в схемах, на работоспособности которых не оказывается существенно изменение характеристик проводимости диодов в обратном направлении.

При воздействии малых доз гамма-облучения ( $10^4$  Р при мощности дозы  $6 \cdot 10^4$  Р/ч) обратный ток плоскостных германиевых диодов возрастает на 10%, на такую же величину уменьшается емкость  $p-n$  перехода, а также возникают фототоки.

Через несколько дней после прекращения облучения эти параметры восстанавливаются до первоначального уровня.

*Кремниевые диоды.* Под воздействием нейтронной радиации проводимость точечно-контактных диодов уменьшается в прямом и в обратном направлениях; у плоских диодов проводимость в прямом направлении также уменьшается. В обратном направлении проводимость некоторых типов плоскостных кремниевых диодов с увеличением нейтронного потока сначала увеличивается, достигает максимума при некоторой величине потока, после чего уменьшается.

Повреждения плоскостных диодов обуславливаются, главным образом, изменением характеристик проводимости в прямом направлении. Изменения характеристик тем больше, чем больше мощность потока.

Заметные изменения характеристик начинаются при нейтронном облучении потоками около  $10^{12}$  нейтр/см<sup>2</sup>. Если изменения характеристик в прямом направлении не влияют существенно на работу схемы, кремниевые диоды могут быть использованы при облучении нейтронными потоками  $10^{13} \dots 10^{17}$  нейтр/см<sup>2</sup>.

Воздействие гамма-облучения (мощность дозы  $10^6$  Р/ч) вызывает обратимые изменения обратного тока, составляющие  $10^{-8}$  А.

Характер воздействия облучения электронами и протонами на германиевые и кремниевые диоды аналогичен нейтронному.

## 6.6. Воздействие радиации на транзисторы

Воздействие быстрых нейтронов вызывает нарушение кристаллической решетки материала (основной эффект) и ионизацию (вторичный эффект). Вследствие этого изменяются параметры полупроводниковых материалов – время жизни неосновных носителей  $\tau$ , удельная проводимость ( $\rho$ ) и скорость поверхностной рекомбинации дырок с электронами. Вследствие изменения указанных параметров под действием радиации уменьшается коэффициент усиления по току  $\beta_0(\alpha_0)$ , увеличивается обратный ток коллектора  $I_{ko}$ ; возрастают шумы транзистора. Изменение коэффициента усиления являются необратимыми, а изменение обратного тока могут быть необратимыми и обратимыми.

Бомбардировка протонами и электронами влияет на характеристики транзисторов так же, как нейтронная радиация.

*Влияние радиации на коэффициент усиления.* Максимальный интегральный поток частиц  $\Phi$ , который может выдержать транзистор для заданного изменения параметра  $\beta_0$ , определяется из соотношения:

$$\Phi = \frac{5,15Kf_a}{\beta_0} \left( \frac{\beta_0}{\beta_0^{\text{об}}} - 1 \right), \quad (49)$$

где  $f_a$  – граничная частота усиления по току в схеме с общей базой, Гц;  $\beta_0$  – коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером (до начала облучения);  $\beta_0^{ob}$  – коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером (после облучения);  $K$  – постоянная, зависящая от типа транзистора, (нейтр)/см<sup>2</sup> (таблица 12).

Как видно из таблицы 12, наибольшее значение величины  $K$ , а следовательно, и наибольшую радиационную стойкость имеют германиевые  $p-n-p$  транзисторы.

Таблица 12  
Значения коэффициента  $K$

Материал	Тип проводимости транзистора	$K$
Германий $n$	$p-n-p$	$(4.2 \pm 0.2) \cdot 10^7$
Германий $p$	$n-p-n$	$(1.8 \pm 0.2) \cdot 10^7$
Кремний $n$	$p-n-p$	$(3.1 \pm 0.4) \cdot 10^6$
Кремний $p$	$n-p-n$	$(4.6 \pm 3.3) \cdot 10^6$

Экспериментально установлено, что германиевые  $p-n-p$  транзисторы, при прочих равных условиях, выдерживают поток быстрых нейтронов на 1–2 порядка больше, чем кремниевые. Ориентировочно для оценки радиационной стойкости транзисторов можно воспользоваться диаграммой, изображенной на рисунке 28. Данные, приведенные на этой диаграмме, получены в результате облучения транзисторов 28 различных типов нейтронами и гамма-лучами. Левые границы прямоугольников соответствуют тем значениям потоков и доз, при которых становятся заметными необратимые изменения, а правые границы – значениям потоков и доз, при которых характеристики транзистора находятся на грани пригодности (в качестве критерия годности выбрано изменение коэффициента усиления  $\beta_0$ ).

При выборе типов транзисторов для устройств, работающих в условиях ионизирующей радиации, предпочтение следует отдавать германиевым  $p-n-p$  транзисторам с высоким значением  $f_a$  и малым  $\beta_0$ .

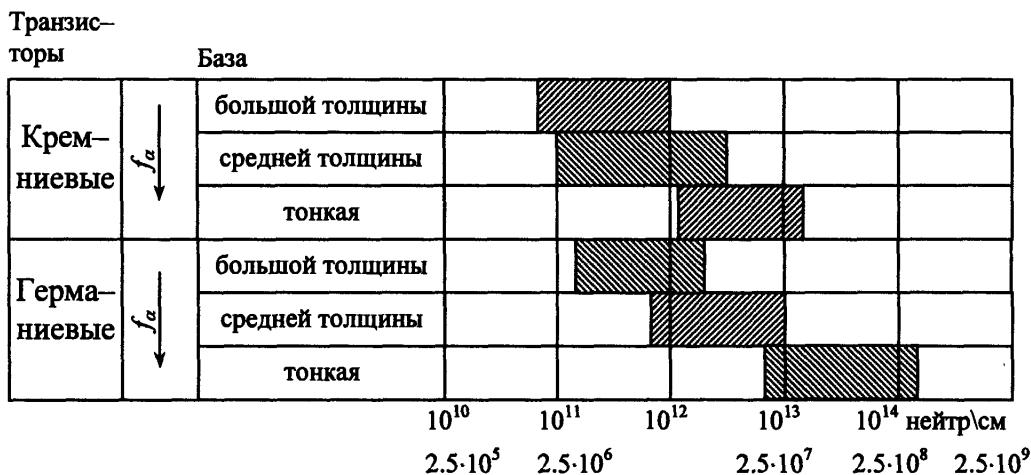


Рис. 28. Радиационная стойкость кремниевых и германиевых транзисторов с разной толщиной базы.

*Влияние радиации на величину обратного тока коллектора.* Под действием радиации происходит в основном кратковременные изменения величины  $I_{ко}$ . Причины этих изменений следующие:

- ионизация, создаваемая гамма-лучами, изменяющая поверхностные свойства полупроводника;
- напряжение фотогальванического происхождения при образовании электронно-дырочных пар; это напряжение зависит от времени жизни неосновных носителей заряда и тем выше, чем больше время жизни;
- свойства материала корпуса, окружающего переход; материал корпуса оказывает влияние на величину поверхностных эффектов;
- разрушения в полупроводнике, обусловленные нейтронами.

Удовлетворительного метода предсказания действия радиации на обратный ток коллектора до сих пор не обнаружено. Экспериментально установлено, что ток  $I_{ко}$  как германиевых, так и кремниевых транзисторов возрастает в течение периода облучения. При удалении их из поля облучения обратный ток может уменьшаться либо до своего первоначального, либо до промежуточного значения, обусловленного необратимыми изменениями.

*Влияние радиации на шумы транзистора.* Внезапная ионизация, созданная радиацией, инжектирует избыток носителей в транзистор, вследствие чего возникают значительные шумы. Было, например, установлено, что в транзисторе, облученном потоком гамма-лучей при помощи дозы  $2 \cdot 10^6$  Р/ч, шумы возрастают на 25 дБ. Вынужденный шум исчезает сразу после удаления транзистора из поля действия излучения.

## 7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ РЭС

### 7.1. Проблема помехоустойчивости РЭС

Повышение плотности электромонтажа в пределах интегральных схем, микросборок и функциональных ячеек, применение многоуровневой разводки, снижение напряжения питания обуславливают наличие паразитных связей, наводок, возникновение внутренних помех при функционировании РЭС. Основными видами паразитных связей в РЭС являются емкостные и индуктивные связи, а также связь через общее активное и индуктивное сопротивление цепи питания.

Искажение основных сигналов и уровень помех зависит от ряда факторов, определяемых, в частности, конструкцией электромонтажа: электрической длиной электромонтажной линией связи и неоднородностью их параметров, к которым в первую очередь относится характеристическое (волновое) сопротивление; величиной и характером электромонтажных линий; числом взаимодействующих линий; параметрами генераторов и приемников; помех (амплитудой, длительностью, фазой, полярностью сигналов, входным и выходным сопротивлением, емкостью схемы).

Для РЭС с повышенной плотностью упаковки ИМС и многоуровневой коммутацией характерно наличие значительных емкостных связей между сигнальными проводниками, расположенными на различных уровнях коммутации. Уровень этих паразитных связей повышается с уменьшением толщины изоляции

и увеличением числа пересечений проводников. Он зависит также от физических характеристик конструкционных материалов, в частности от диэлектрической проницаемости изоляционных материалов.

Для снижения уровня помех, обусловленных емкостной и индуктивной связями между коммуникационными элементами РЭС следует располагать проводники в соседних слоях во взаимно перпендикулярных направлениях, обеспечивать минимальную длину проводников. Длина проводников не должна превышать допустимых значений, определяемых из условий помехоустойчивости и заданного быстродействия ИМС. Значение паразитных емкостей уменьшается при использовании проводников малой ширины, что, однако, приводит к значительному увеличению их сопротивлений. Для снижения уровня помех, обусловленных индуктивностями шин питания и заземления, необходимо увеличивать их ширину и располагать шины друг под другом на соседних уровнях коммутации. Существенного снижения паразитных эффектов и повышения помехоустойчивости РЭС можно добиться экранированием связей, конструированием линий электромонтажа с учетом компенсации помех противоположной полярности, использованием экранирования, развязывающих фильтров, элементов согласования и заземления.

## 7.2. Виды и эквивалентные схемы паразитных связей

Помехи в электрических линиях связи возникают из-за «паразитных» связей между различными электрическими соединениями и различными компонентами в пределах одного соединения (например, шины питания) и могут привести к сбою в работе РЭС. Несмотря на то что, в цифровых узлах используются схемы с небольшим коэффициентом усиления по напряжению (в  $10^4 \dots 10^5$  раз меньшим, чем, например, в аналоговых блоках РЛС), наличие большого числа параллельных связей, а также высокая плотность компоновки требуют принятия специальных мер для обеспечения ЭМС с учетом помех в электрических линиях связи. Паразитные связи определяются конструкцией РЭС и параметрами используемых материалов (особенно диэлектрической проницаемостью). Все виды внутренних паразитных связей делят на емкостные, индуктивные и кондуктивные. Если сигнал (составляющая спектра), наводящий помеху, имеет гармонический характер, то независимо от характера паразитной связи (рис.29), амплитуда помехи может быть определена по формуле

$$U_{\text{пом}} = \frac{U_{\text{и пом}} \cdot Z_h}{Z_h + Z_{\text{пар}}}, \quad (50)$$

где  $U_{\text{пом}}$  – напряжение помехи на сопротивлении нагрузки  $Z_h$ ;  $U_{\text{и пом}}$  – напряжение источника помех, приложенное к линии, наводящей помеху;  $Z_{\text{пар}}$  – сопротивление паразитной связи;  $K_{\text{пар}} = Z_h / (Z_h + Z_{\text{пар}})$  – коэффициент связи по напряжению.

Из рассмотрения рис. 29,а и формулы (50) следует, что в общем случае сопротивление паразитной связи и сопротивление нагрузки образуют делитель напряжения. В том случае, когда паразитная связь носит емкостной характер (рис. 29,б),  $Z_{\text{пар}} = 1 / (\omega C_{\text{пар}})$ , где  $C_{\text{пар}}$  – паразитная емкость (емкость паразитной связи).

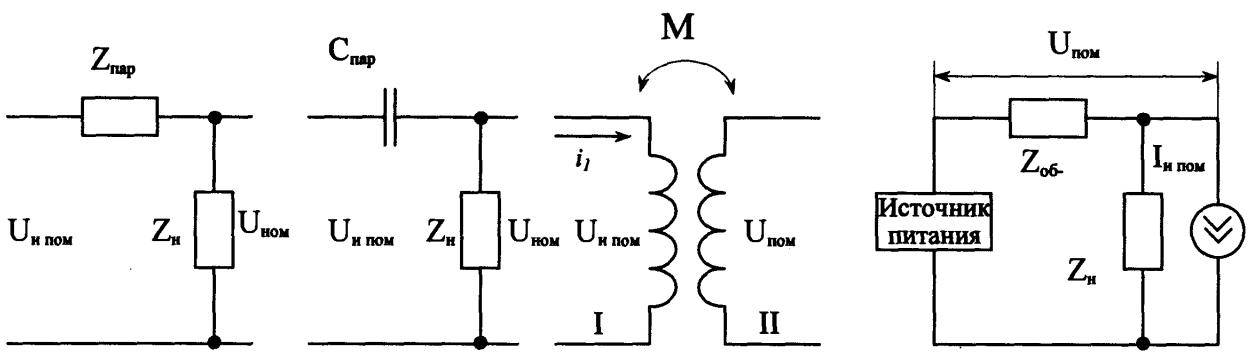


Рис. 29. Схемы паразитной связи:  
а – обобщенной; б – емкостной; в – индуктивной; г – кондуктивной.

Тогда

$$U_{\text{пом}} = U_{\text{ипом}} \cdot \frac{C_{\text{пар}}}{(C_H + C_{\text{пар}})} = U_{\text{ипом}} \cdot K_c, \quad (51)$$

где  $K_c = C_{\text{пар}}/(C_H + C_{\text{пар}})$  – коэффициент емкостной связи;  $C_H = C_{\text{л}} + C_{\text{вых}} + C_{\text{ax}}$  – емкость нагрузки, равная сумме емкостей собственно линии связи, выходной емкости передающей и выходной емкости приемной схемы соответственно.

В том случае, когда паразитная связь носит индуктивный характер (рис. 29,в), напряжение помехи  $U_{\text{пом}} = Mdi_I/dt$ , где  $M$  – взаимная индуктивность, Гн;  $i_I$  – ток в первом контуре, А;  $t$  – время, с. Можно показать, что  $U_{\text{пом}} = U_I M/L_1 = U_I K_L$ , где  $K_L = M/L_1$  – коэффициент индуктивной связи;  $L_1$  – индуктивность первого контура. Можно определить  $K_L$ , не вычисляя  $M$  и  $L_1$ , а используя то обстоятельство, что при  $\epsilon = \mu = 1$  (вакуум) коэффициент емкостной связи в вакууме  $K_{c0}$  равен коэффициенту индуктивной связи  $K_L$ .

При кондуктивной связи (рис. 29,г) помехи выделяются на сопротивлении связи  $Z_{\text{общ}}$ , которое складывается из внутреннего сопротивления шин питания  $Z_{\text{шп}}$  и внутреннего сопротивления источника питания  $Z_{\text{ин}}$ . Так как  $Z_{\text{общ}} \ll Z_H$ , то коэффициент кондуктивной связи

$$K_z = \frac{Z_{\text{общ}}}{(Z_{\text{общ}} + Z_H)} \approx \frac{Z_{\text{общ}}}{Z_H}, \quad (52)$$

Природа  $Z_{\text{общ}}$  зависит от частотного спектра сигнала, наводящего помеху. Для постоянного тока и очень низких частот это в основном сопротивление дросселей фильтра, диодов выпрямителя, внутреннего сопротивления химических источников питания; для звуковых частот – активное сопротивление шин питания, емкостное сопротивление конденсаторов фильтра; на высоких частотах – индуктивное сопротивление шин питания и конденсаторов фильтра.

Чтобы оценить ожидаемое искажение сигналов и наводки (помехи), необходимо рассчитать электрические параметры линий связи ( $L_x, C_x, C_{\text{пар}}, Z_x, M, Z_{\text{общ}}$ ) по известным конструктивным данным (геометрическим размерам, физическим параметрам материалов, конструктивному исполнению, числу и взаимному расположению взаимодействующих линий связи по формулам, приведенным в [2]).

### 7.3. Обеспечение электромагнитной совместимости РЭС экранированием

Если при разработке конструкции аналогового узла указанные меры по обеспечению электромагнитной совместимости окажутся недостаточными, то осуществляют экранирование, уменьшающее перекрестные помехи в требуемое число раз. Однако это увеличивает сложность аппаратуры, ее габариты, массу, стоимость. Экранирование заключается в локализации электромагнитной энергии в определенном пространстве. Поглощая и отражая поток электромагнитной энергии, создаваемой источниками поля, экран отводит его от защищаемой области. Эффективностью экранирования ( $\mathcal{E}$ ) называют отношение напряжений, токов, напряженностей электрического и магнитных полей в экранируемой области при отсутствии и при наличии экрана:  $\mathcal{E} = U/U' = I/I' = E/E' = H/H'$ . В технике проводной связи эту величину принято оценивать в неперах:  $B = \ln \mathcal{E} = 0.115$  А. В радиотехнике эффективность экранирования (экранное затухание) оценивают в децибелах:  $A = 20 \lg \mathcal{E} = 8.7$  В.

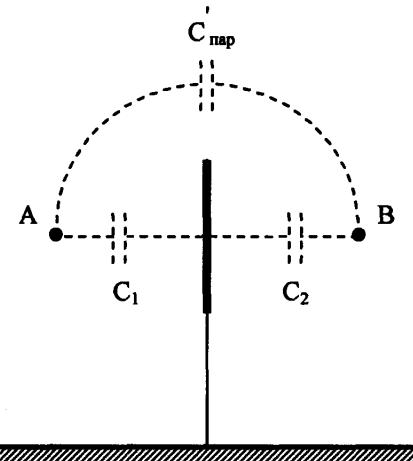


Рис. 30. Действие электростатического экрана, соединенного с земляной шиной

В ближней зоне (на низких частотах) используется экранирование электростатической или магнитной составляющей поля, а в дальней зоне (на высоких частотах) – электромагнитного поля. При конструировании необходимо ясно представлять физику работы электростатического, магнитостатического и электромагнитного экранов.

Электростатическое экранирование основано на замыкании электрического экрана (паразитной емкости) на шину с нулевым потенциалом (корпус, «землю»). Например, помещение заземленного электростатического экрана между точками А и В (рис. 30) приводит к замыканию емкостей  $C_1$  и  $C_2$  на землю, а емкость  $C_{\text{пар}}$  уменьшается до  $C_{\text{пар}}$  (за счет длины силовых линий поля между точками А и В). Эффективность экранирования  $\mathcal{E} = C_{\text{пар}}/C_{\text{пар}}$ .

Если установка крышки блока увеличивает емкость  $C_{\text{пар}}$  между точками А и В (за счет емкостей  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ , рис. 31, а), экран плохо соединен с землей или имеет индуктивность соединительного проводника (рис. 31, б), то эффективность экранирования резко снижается.

При выполнении электростатического экрана в виде сплошной замкнутой поверхности емкость  $C_{nap} \rightarrow 0$  и  $\mathcal{E} \rightarrow \infty$ . В реальных конструкциях имеются отверстия для доступа внутрь экрана, и оценить емкость  $C_{nap}$  можно только экспериментально. Однако если отверстия и щели в электростатическом экране соизмеримы с длинной волны электромагнитных колебаний, то через них может проникать электромагнитной поле.

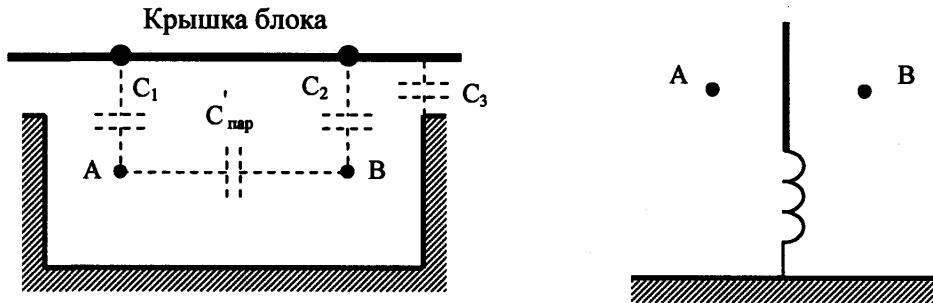


Рис. 31. Влияние металлической крышки блока (а) и индуктивности провода, соединяющего экран с корпусом (б), на паразитную связь между точками А и В.

Эффективность экранирования электростатического поля не зависит от толщины и металла экрана, так как токи, протекающие по нему, малы. Часто электростатические экраны выполняют в виде тонкого слоя металлизации диэлектрика (нижней стороны металлокерамического корпуса ИС, пластмассового каркаса катушек индуктивности). В трансформаторах часто электростатический межобмоточный экран выполняют в виде незамкнутого кольца из медной фольги или обмотки, один конец которых соединен с «землей».

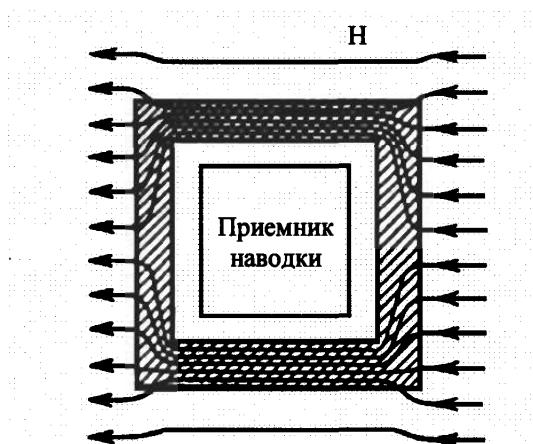


Рис. 32. Действие экрана из ферромагнитного материала.

Магнитостатические экраны применяют для защиты от постоянного и медленно меняющихся магнитных полей (частотой 0...3000 Гц). Их изготавливают из ферромагнитных материалов (пермалloy, сталь, ферриты) с большой относительной магнитной проницаемостью. Толщина экрана из металла составляет 0.5...1.5 мм. При наличии такого экрана силовые линии магнитного поля  $H$  проходят в основном по его стенкам (рис. 32), которые обладают малым магнитным сопротив-

лением по сравнению с сопротивлением воздушного пространства около экрана (эффект поглощения). Эффективность экранирования таких полей зависит от магнитной проницаемости экрана и от его толщины, а также от наличия стыков и швов, расположенных перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Этот вид экранирования называется магнитным шунтированием и дает сравнительно небольшой и практически одинаковый экранирующий эффект во всем диапазоне НЧ.

С ростом частоты возрастает роль вихревых токов, происходит вытеснение магнитного поля из толщи экрана, что эквивалентно уменьшению магнитной проницаемости, и экран переходит в электромагнитный режим работы. Магнитный экран одинаково пригоден для защиты от воздействия внешнего магнитного поля и внешнего пространства от магнитного поля, созданного источником внутри экрана. Эффективность экранирования магнитостатическим экраном можно определить по формуле  $\mathcal{E} = 1 + \mu d/D$ , где  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала экрана;  $d$  – толщина стенок экрана;  $D$  – диаметр эквивалентного сферического экрана, близкий длине стенки кубического экрана.

При экранировании постоянных магнитных полей следует выполнять следующие рекомендации: применять материалы с возможно более высокой магнитной проницаемостью; избегать в конструкции экрана стыков и швов с большим сопротивлением на пути магнитных силовых линий поля помех; не допускать крепления экранируемого элемента и оболочек экрана стальными деталями, которые могут образовать пути с малыми магнитными сопротивлениями для магнитных силовых линий поля помех; повышать эффективность экрана, применяя материалы с большим значением  $\mu$  или многослойные конструкции тонких экранов, а не увеличивая толщину. Так, если вместо стали взять пермалloy с  $\mu = 5000$ , то при той же толщине экрана эффективность экранирования возрастет в 3...5 раз. Конструктивно расстояние между экранирующими оболочками принимают равным расстоянию между первой оболочкой и ближайшим краем экранируемого объекта.

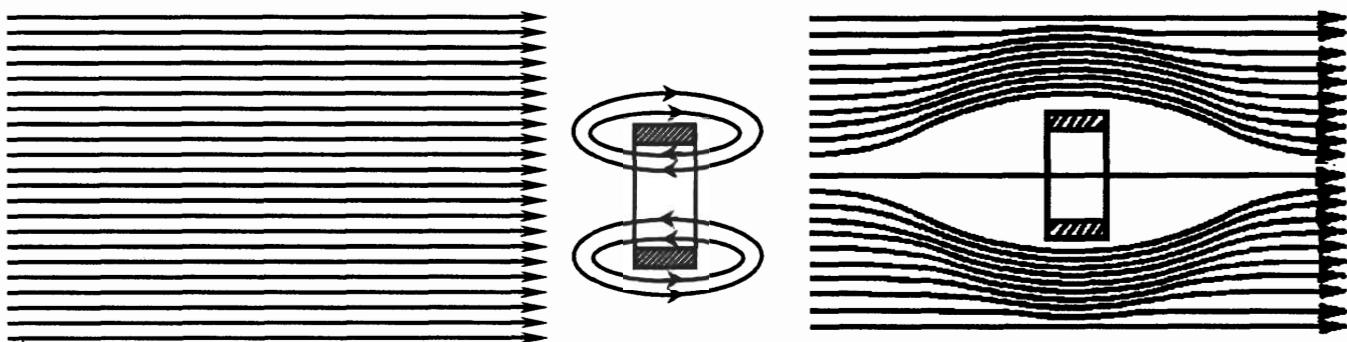


Рис. 33. Вытеснение электромагнитного поля вихревыми токами в экране:  
а – внешнее поле; б – поле вихревых токов; в – суммарное поле.

Электромагнитное экранирование применяют на частотах выше 3000 Гц. Экраны изготавливают из немагнитных и ферромагнитных материалов, что дает одновременное ослабление электрической и магнитной составляющих поля. Упрощенно суть экранирования сводится к тому, что под действием источника элек-

тромагнитной энергии на стороне экрана, обращенной к источнику, возникают заряды, а в его стенках – токи, образующие во внешнем пространстве поля, по напряженности близкие полю источника, а по направлению противоположные ему (рис. 33). В результате внутри экрана происходит взаимная компенсация полей, а снаружи его – вытеснение внешнего поля полями вихревых токов (эффект отторжения). Кроме того, происходит поглощение поля за счет потерь на джоулеву теплоту (при протекании вихревых токов по стенкам экрана) и на перемагничивание (если экран выполнен из ферромагнитного материала). Сталь на высоких частотах дает больший экранирующий эффект, чем немагнитные материалы, однако надо учитывать, что стальной экран может вносить значительные потери из-за своего большого удельного сопротивления и явления гистерезиса.

Плотность вихревых токов уменьшается в металлическом экране от поверхности вглубь него. Это уменьшение тем больше, чем выше частота поля и чем больше удельное сопротивление материала экрана. За глубину проникновения  $\delta$  принято расстояние, на котором плотность тока меньше, чем на поверхности в  $e$  раз ( $1/2.72$ ), т.е. составляет 0.37 плотности и напряженности на поверхности. Начиная с частоты  $10^4$  Гц экран из любого металла толщиной 0.5...1.5 мм действует весьма эффективно, а на частотах выше 10 МГц медная и тем более серебряная фольга толщиной около 0.1 мм дает значительный экранирующий эффект, что делает целесообразным использование фольгированного диэлектрика. При выборе материала экрана и его толщины необходимо учитывать не только электрические свойства материала, но и его механическую прочность, массу, коррозийную стойкость, удобство изготовления, обеспечение надежного контакта с шиной нулевого потенциала, теплоотвод и т.д.

На низких частотах, когда толщина экрана  $d$  меньше глубины проникновения  $\delta$ , поверхностный эффект можно не учитывать и эффективность экранирования определять по приближенной формуле

$$\Theta = \sqrt{1 + [\omega \mu_0 \sigma D d / (2m)]^2}, \quad (53)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота,  $\text{с}^{-1}$ ;  $D$  – ширина коробки прямоугольного экрана или диаметр цилиндрического и сферического экрана, см;  $d$  – толщина стенок экрана, см;  $m$  – коэффициент формы экрана ( $m=1$  для прямоугольного,  $m=2$  для цилиндрического и  $m=3$  для сферического);  $\sigma$  – удельная проводимость материала экрана,  $\text{См}\cdot\text{мм}^{-1}\cdot 10^3$ ;  $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-8}$  Гн/см – магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума).

На высоких частотах при  $d > \delta$  действуют оба фактора и эффективность экранирования можно определить по приближенной формуле

$$\Theta = e^{d/\delta} \left( \frac{1}{2} + \frac{D}{2,8m\delta} \right), \quad (54)$$

где  $D, \delta, d$  берутся в миллиметрах или сантиметрах.

Для уменьшения потерь при экранировании ВЧ-катушек диаметр экрана обычно в два раза превышает диаметр катушек.

На частоте  $10^8$  Гц длина волны становится соизмеримой с размерами экрана, и он переходит в волновой режим работы, отличающийся колебательным характером изменения затухания электрической и магнитной волны с изменением частоты и наличием резонансов. Резонансные явления имеют место как для плоской волны, так и для электрической и магнитной составляющих поля. Например, для волны  $E$  резонанс наступает при отношениях поперечного размера экрана к длине волны, равных 1.22; 2.234; 3.238 и т.д. При резонансе происходит суммирование всех полей отраженных стоячих волн. Это приводит к уменьшению экранного затухания ( $A_s$ ), обусловленного отражением ( $A_{omp}$ ) и поглощением ( $A_{npl}$ ) на величину, обусловленную резонансными потерями ( $A_{pez}$ ). Кроме того, имеет место уменьшение экранного затухания на величину  $A_\phi$  из-за отличия формы экрана от плоской ( $A_\phi=0$  для плоского экрана,  $A_\phi=10$  для цилиндрического,  $A_\phi=9.6$  для сферического). Тогда общее экранное затухание  $A_s = A_{omp} + A_{npl} - A_{pez} - A_\phi$ .

#### 7.4. Фильтрация как способ ослабления помех

Ослабление помех при фильтрации достигается:

- 1) шунтированием их на землю,
- 2) отражением помех обратно к источнику,
- 3) рассеянием (превращением помех в тепловую энергию).

Эффективность фильтрации определяется вносимым затуханием фильтра,  $\text{dB}$

$$S = 20 \lg \left| \frac{U_1}{U_2} \right| \quad \text{или} \quad S = 20 \lg \left| \frac{I_1}{I_2} \right|, \quad (55)$$

где  $U_1, I_1$  – напряжение и ток помех в исходном состоянии на нагрузке,  $U_2, I_2$  – напряжение и ток помех на нагрузке в цепи с фильтром.

Основными требованиями, предъявляемыми к фильтру, являются:

- 1) обеспечение заданной эффективности фильтрации в требуемом частотном диапазоне;
- 2) ограничение допустимого падения постоянного или переменного напряжения на фильтре при максимальном токе нагрузки;
- 3) ограничения по требованиям техники безопасности допустимого значения реактивной составляющей тока на основной частоте;
- 4) обеспечение допустимых нелинейных искажений питающего напряжения, определяющих требования к линейности фильтра;
- 5) выбор элементов фильтра с учетом возможных бросков токов и напряжений, вызванных переходными процессами;
- 6) конструктивные: эффективность экранирования, минимальные массо-габаритные показатели, обеспечение нормального теплового режима, стойкость к механическим и климатическим воздействиям, технологичность конструкции и др.

На рисунке показаны фильтры низких частот, пропускающие без искажения НЧ сигналы и отражающие высокочастотные. Часто достаточно подключить конденсатор малой емкости или индуктивность вблизи помехосоздающих или чувствительных схем (рис. 34, а и б).

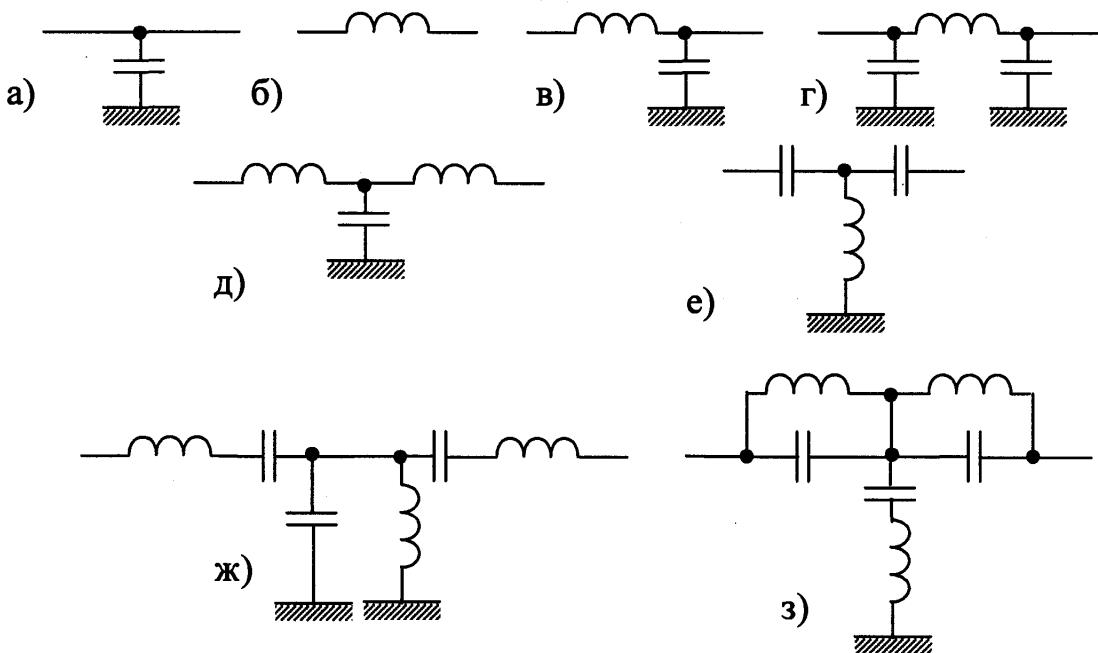


Рис. 34. Дискретные фильтры.

Наилучшую защиту от выбросов и других переходных процессов обеспечивает Т-образный фильтр (рис. 34, д).

На рисунке 34, е показан фильтр ВЧ, который ослабляет НЧ сигнал и пропускает без искажений ВЧ. Такой фильтр может использоваться, например, в ЧМ-приемниках для предотвращения помех, возникающих в результате эффекта НЧ выпрямления, от АМ-передатчиков персональных радиостанций, ведущих передачи в НЧ диапазоне.

На рисунке 34, ж показан полосовой фильтр, пропускающий сигналы только в узкой полосе частот, а на рисунке 34, з – узкополосный режекторный фильтр (фильтр–пробка), блокирующий прохождение сигнала в узкой полосе частот.

При использовании фильтров с потерями, превращающих энергию паразитных сигналов в тепло, простейшим фильтром является надетое на проводник ферритовое кольцо. На НЧ такой фильтр является хорошим проводником, а на ВЧ его сопротивление равно 50–200 Ом.

## 7.5. Заземление

Термин «земля» обозначает систему проводящих поверхностей и электрических соединений, предназначенных для выполнения различных функций. Во-первых, это проводящие поверхности, потенциал которых считается нулевым и принимается за начало отсчета напряжений различных сигналов. Во-вторых, указанные поверхности предназначены для протекания обратных токов в цепях сигналов, а также силовых токов в цепях электропитания. В-третьих, заземление экранирующих поверхностей способствует ослаблению нежелательных связей и

выполняет функции составной части системы экранирования. Наконец, заземление корпусов различной аппаратуры и соединительных проводов позволяет исключить поражение обслуживающего персонала электрическим током. Защитные земляные поверхности должны обязательно иметь электрическое соединение с землей и равный с ней потенциал.

При правильном проектировании система заземлений выполняет все перечисленные функции и способствует улучшению условий ЭМС. В то же время ошибки, допущенные при проектировании заземлений, могут явиться причиной возрастания уровня помех и нарушения ЭМС. Рассмотрим основные факторы, вызывающие возникновение помех в цепях заземления аппаратуры.

Одна из главных причин связана с тем, что перечисленные типы заземлений редко удается выполнить обособленными. Совмещение нескольких функций одной системой проводников и проводящих поверхностей приводит к тому, что по указанным проводникам протекают электрические токи от различных источников (рис. 35). В общем случае это обратные токи  $I_1$  для различных сигналов, токи  $I_2$  в цепи защитного заземления, токи  $I_3$ , обусловленные заземлением экрана. Из-за конечного сопротивления земляной шины на любом ее участке, например а–б на рис. 35, создается падение напряжения  $U_n = (I_1 + I_2 + I_3)R_{ab}$ , пропорциональное токам, протекающим в цепи заземления. Это напряжение представляет собой ЭДС помех для любого рецептора, где участок указанной шины используется в качестве проводника его электрической цепи (участок а–б, рис. 35). Чтобы представить себе порядок величин, обратимся к примеру. Пусть сопротивление  $R_{ab}$  общего участка этих цепей равно  $10^{-2}$  Ом, а ток помех равен 1 А. Падение напряжения на этом сопротивлении составляет 10 мВ, что может быть совершенно недопустимым для многих рецепторов.

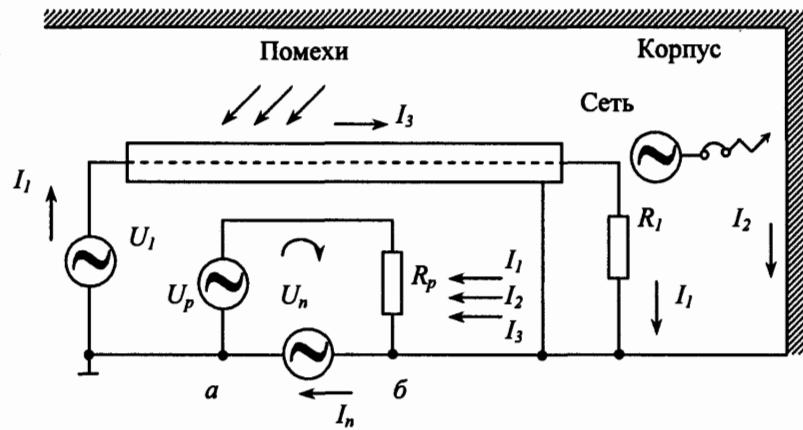


Рис. 35. Схема влияния помех в системе заземлений

Вторая причина возникновения помех в цепях заземлений связана с образованием так называемых контуров заземления. Рассмотрим два устройства, соединенные парой проводников, один из которых является сигнальным, а другой служит для протекания обратных токов (рис. 36). Пусть возвратный проводник соединен с корпусом устройства, а корпус с землей. Если это проводник соединен с

корпусом и второго устройства, также имеющего электрический контакт с землей (соединение 2'-3'), образуется замкнутый проводящий контур 2-2'-3'-3-2. Внешнее электромагнитное поле наводит в этом контуре ЭДС помех, вызывая протекание тока  $I_n$ , который в свою очередь, создает на участке 2-3 падение напряжения, равное  $I_n Z_{13}$ . В результате разность потенциалов между точками 1-2 изменяется на значение  $U_n = I_n Z_{13}$ , представляющее собой напряжение помех на входе рецептора. Если отсутствует проводник 2'-3' или соединение проводника 2-2' с корпусом второго устройства, возможность образования контура заземления полностью исключается. В этих случаях контур может состоять из проводников 2-2', 3-3', земляной шины и паразитных емкостей между сигнальной цепью и корпусом устройства  $C_2$ , а также между корпусом и землей  $C_{23}$  (см. рис. 36).

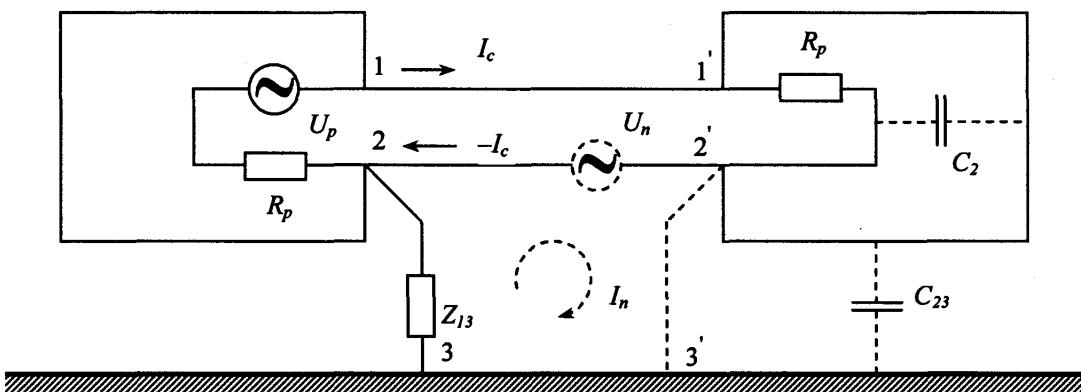


Рис. 36. Схема образования контура заземления.

Таким образом, напряжение помехи, связанное с несовершенством системы заземления, оказывается тем больше, чем больше сопротивление земляной шины, большее площадь контура заземления и большее комплексное сопротивление заземляющих проводников. Поэтому наиболее общие правила выполнения заземлений состоят в следующем:

1. Сопротивления заземляющих проводников, а также общих земляных шин должны быть минимальны. Еще раз подчеркнем, что на уровень помех влияет комплексное сопротивление указанных проводников, которые должны обладать минимальными активным сопротивлением и собственной индуктивностью. С учетом того, что помехи могут быть как низкочастотными, так и высокочастотными, выполнение указанного требования осложняется наличием поверхностного эффекта, приводящего к росту активного сопротивления и индуктивности проводника.

Для реализации этого требования заземляющие проводники должны прежде всего иметь минимально возможную длину  $l_3$ , значительно меньшую длины волны помехи. Практически считается, что  $l_3 < 0,02 \lambda_n$ . Для уменьшения сопротивления форма и размеры поперечного сечения заземляющих проводников должны быть такими, чтобы на частоте помехи обеспечивались малые активное и реактивное сопротивления. Поскольку эти величины уменьшаются с ростом поперечных размеров проводника, а по мере повышения частоты все более проявляется поверхностный эффект, целесообразно применять заземляющие проводники в ви-

де трубок, обладающих наименьшим полным сопротивлением среди других проводников с такой же площадью поперечного сечения.

Важную роль в системе заземлений играет также качество электрических соединений. Соединения должны обеспечивать, во-первых, минимальное сопротивление контакта, а во-вторых, надежный контакт в условиях климатических воздействий, а также вибраций. Кроме того, соединения должны исключить возможность образования окисных пленок на контактирующих поверхностях и связанных с ними нелинейных эффектов. Наконец, соединения должны исключить образование гальванических пар для предотвращения коррозии и появления помех, связанных с возникновением соответствующей ЭДС в цепи. Качественное выполнение соединений представляет собой важную конструкторскую задачу.

2. Следует по возможности избегать использования общих проводников в системах экранирующего и защитного заземлений и цепях, по которым протекают слабые токи сигналов.

3. Контуры заземлений должны по возможности отсутствовать. Для их исключения используют изолирующие (рис. 37,а) и нейтрализующие (рис 37,б) трансформаторы или оптроны (рис 37,в).

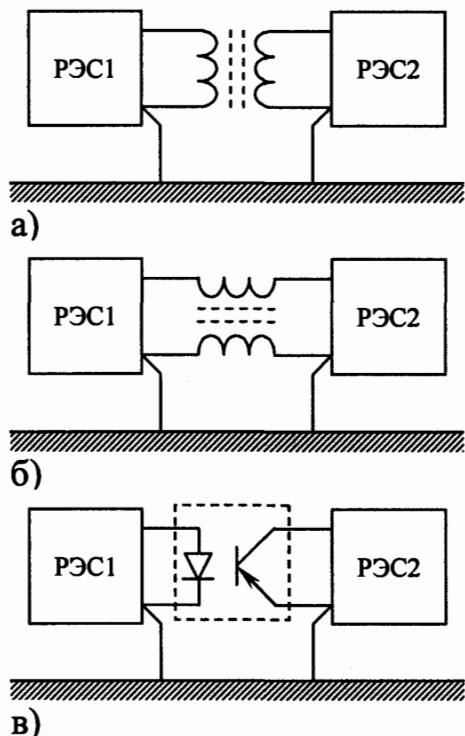


Рис. 37. Схемы устранения контуров заземлений

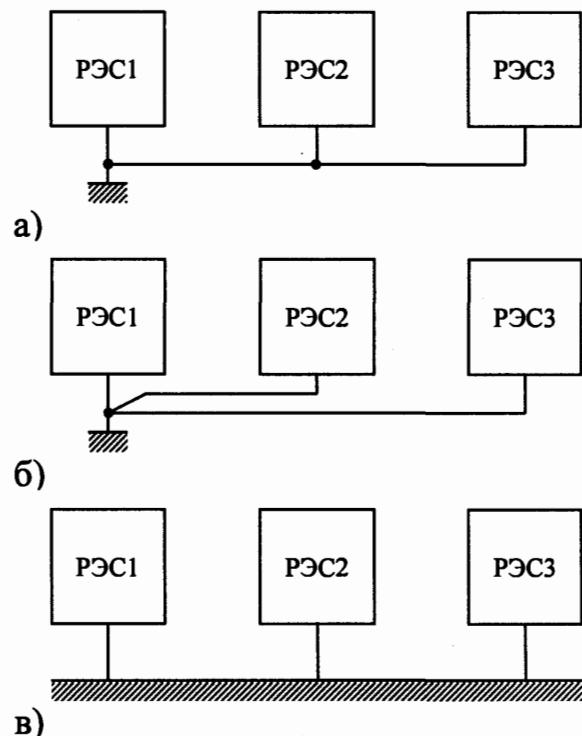


Рис. 38. Типичные схемы заземлений аппаратуры

Остановимся кратко на некоторых практических сторонах выполнения поставленных требований. Основными типами заземлений являются: последовательное в одной точке (рис 38,а), параллельное в одной точке (рис 38,б) и много точечное (рис 38,в). Одноточечная последовательная схема наиболее проста, однако ей свойственен наибольший уровень помех, обусловленных протеканием токов

по общему участку заземляющей цепи. Одноточечная параллельная схема свободна от этого недостатка, однако требует большого числа протяженных заземляющих проводников. В этом случае трудно обеспечить малое сопротивление заземляющих участков цепей. Кроме того, при использовании параллельной схемы заземления становится возможной заметная электромагнитная связь заземляющих проводников, увеличивая уровень помех в цепях заземления рецепторов.

Многоточечная система заземления практически свободна от этих недостатков, однако в этом случае необходимы специальные меры для исключения контуров заземления. Поэтому практические схемы заземления выбирают из условия компромисса и представляют собой комбинации из перечисленных типов. При этом на более низких частотах отдается предпочтение одноточечной, а на более высоких частотах – многоточечной схеме заземления. Низкочастотные системы заземления наиболее целесообразно выполнять раздельными, т.е. использовать отдельные заземляющие проводники, по которым протекают обратные токи силовых и сигнальных цепей.

## **8. НАДЁЖНОСТЬ РЭС, МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

### **8.1. Основные понятия теории надёжности РЭС**

Термины и определения даются в соответствии с требованиями ГОСТ 22.002–83.

Надежность – свойство РЭС сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Надёжность – комплексное свойство РЭС, характеризуемое в общем случае, безотказностью, долговечностью, ремонтопригодностью и сохраняемостью.

Безотказность – свойство РЭС непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение заданного интервала времени.

Долговечность – свойство РЭС сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Ремонтопригодность – свойство РЭС, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений, и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Сохраняемость – свойство РЭС сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтопригодности в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Работоспособное состояние (работоспособность) – состояние РЭС, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Если состояние РЭС соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации, то такое состояние называется

ется исправным. Если состояние РЭС не соответствует хотя бы одному из этих требований, то такое состояние называется неисправным.

Отказом называется событие, заключающееся в нарушении работоспособности РЭС. При этом различают внезапный отказ, при котором происходит скачкообразное изменение одного или нескольких параметров РЭС и постепенный (параметрический) отказ, характеризующийся постепенным изменением значений одного или нескольких параметров РЭС.

Постепенный отказ обусловлен процессами старения, деградации и износа аппаратуры. Более подробно его роль рассмотрена в разделах, посвященных параметрической надежности.

Наработка – продолжительность или объем работы РЭС. Различают также наработку до отказа – наработку РЭС от начала эксплуатации до возникновения первого отказа, и наработку между отказами – наработку РЭС от окончания восстановления ее работоспособного состояния после отказа до возникновения следующего отказа.

Технический ресурс – наработка РЭС от начала её эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние (т.е. состояние, при котором дальнейшее применение недопустим или нецелесообразно).

Показатели надежности РЭС разделяются на показатели безотказности, долговечности, ремонтопригодности и сохраняемости.

## **8.2. Причины возникновения отказов РЭС**

Причины возникновения отказов РЭС многочисленны и обусловлены ошибками, допущенными при проектировании и в процессе эксплуатации, случайными факторами, постепенным изменением свойств РЭА вследствие старения и износа. В /12/ обращено внимание на специфическую группу отказ-сбой, связанных не с выходом из строя отдельных блоков и узлов РЭС, а с искажениями обрабатываемой информации.

Эти отказы наиболее характерны для РЭС, содержащей ЭВМ, микропроцессоры и другие вычислительные устройства.

Рассмотрим причины низкой надежности РЭС, обусловленные ошибками проектировщиков /13/. На этапе схемотехнического проектирования разработчики, создавая структурную и принципиальную схемы РЭС, закладывают основы надежности будущей аппаратуры. Неоправданное усложнение схемных решений, обусловленное неоптимальными алгоритмами функционирования, приводит к снижению надёжности РЭА, так как при этом увеличивается число элементов схемы, количество электрических контактных соединений.

Важным моментом является выбор соответствующей элементной базы. Как правило, у разработчика имеется несколько вариантов выбора, причем электрорадиоэлементы (ЭРЭ) отличаются по условиям эксплуатации, напряжениям питания, разбросу параметров и т.д. Ясно, что, если значения показателей надежности выбранных ЭРЭ будут меньше заданных величин показателей надежности всей РЭС, то реальные показатели надежности разрабатываемой аппаратуры окажутся ниже заданных.

Часто причиной снижения надежности служат отклонения от номинальных режимов работы ЭРЭ, что приводит к значительному уменьшению их ресурса. Нецелесообразно при наличии технических возможностей предлагать такие решения, при которых различные узлы и блоки РЭС имеют существенно различные ресурсы и показатели надёжности. Следует выбирать такие решения, при которых отдельные узлы и блоки имели бы примерно равные показатели надежности. Влияние постепенных отказов существенно возрастает тогда, когда не обеспечены достаточные допуски на параметры элементов и блоков. В этом случае процессы старения и износа сильнее сказывается на работоспособности РЭС. Следует отметить, что в таких случаях почти всегда приходится искать компромиссные решения, т.к. величины допусков на параметры РЭС и аппаратуры лимитируются функциональной точностью.

Заниженные показатели надежности, полученные на этапе схемотехнического проектирования, могут быть обусловлены недостаточным использованием стандартных, унифицированных узлов и блоков. Это, безусловно, не исключает возможность необходимости новых творческих решений там, где они вызваны практической необходимостью, однако в большинстве случаев целесообразно стремиться к использованию преимуществ стандартизации и унификации.

Существенно снижается надежность РЭС, если она обладает плохой контролепригодностью, и, в частности, если в ней не предусмотрены средства самотестирования.

Причины возникновения отказов РЭС, обусловленные неудовлетворительными конструкторскими решениями, включают недостаточную защиту РЭС от механических воздействий, влияния окружающей среды, действия температурных полей. В некоторых случаях причиной отказов могут служить плохая электромагнитная совместимость, недостаточная защита РЭС от воздействия проникающей радиации, электромагнитного импульса.

Очень существенно может быть снижена надежность РЭС на этапе производства, если используются неэффективные технологические процессы, низка общая культура производства.

### 8.3 Математические методы оценки РЭС

Важнейшей характеристикой надёжности является вероятность безотказной работы  $p(t)$  – вероятность того, что случайная величина – время  $t_\phi$  функционирования РЭС до отказа – будет не меньше заданного интервала времени  $t$  (или, что то же самое, вероятность того, что в пределах заданной наработки отказы в РЭС не возникнут)

$$p(t) = p(t_\phi \geq t). \quad (56)$$

Полагая, что в момент включения РЭС работоспособно:  $p(0)=1$ , можно заметить, что  $P(t)$  есть монотонно убывающая функция, причём  $P(\infty)=0$  (в любой аппаратуре когда-нибудь произойдёт отказ).

С вероятностью безотказной работы  $P(t)$  однозначно связана  $Q(t)$  – вероятность отказа РЭС на интервале времени  $(0,t)$

$$Q(t)=1-P(t), \quad (57)$$

$P(t)$  и  $Q(t)$  есть интегральные функции распределения случайной величины  $t_\phi$ . Часто надёжность удобно характеризовать плотностью вероятности отказов  $f(t)$

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (58)$$

Используя функцию  $f(t)$ , запишем:

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt ; \quad (59)$$

$$P(t) = \int_t^\infty f(t) dt \quad (60)$$

Выражение (60) легко получить, если помнить, что  $f(t)$  удовлетворяет условиям нормировки

$$\int_0^\infty f(t) dt = 1 \quad (61)$$

(т. е. при неограниченном увеличении времени  $t$  отказ обязательно произойдёт). Подставляя (59) и (61) в (57), получим (60).

Часто используется величина  $\bar{T}$ , которая называется средним временем безотказной работы

$$\bar{T} = \int_0^\infty t f(t) dt. \quad (62)$$

Как следует из её определения, это есть математическое ожидание наработки до первого отказа. Интегрируя (62) по частям, получим (с учётом (58))

$$\bar{T} = t \cdot P(t) \Big|_0^\infty + \int_0^\infty P(t) dt \quad (63)$$

или

$$\bar{T} = \int_0^\infty P(t) dt. \quad (64)$$

Интенсивность отказов  $\lambda(t)$  есть условная плотность вероятности появления отказа неремонтируемой РЭА в некоторый момент времени, при условии, что до этого момента отказов не было.

Интенсивность отказов определяется выражением

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (65)$$

Величина  $\lambda(t)$  есть вероятность того, что РЭС откажет в момент времени  $t$ , при условии, что до этого момента она работала безотказно. Ясно, что  $\lambda(t)$  положительно на всём интервале времени  $t \geq 0$ , а при  $t=0 \lambda(t)=f(t)$  (т. к.  $P(0)=1$ ).

Найдём вероятность безотказной работы, используя функцию  $\lambda(t)$ . С учётом (58) выражение (65) можно переписать в виде

$$\lambda(t) = \frac{d[\ln P(t)]}{dt}, \quad (66)$$

что, после интегрирования обеих частей по  $t$ , даёт:

$$P(t) = \exp \left[ - \int_0^t \lambda(t) dt \right]. \quad (67)$$

На практике часто представляется интерес вероятность безотказной работы РЭА на интервале  $(t_1, t_2)$ . В этом случае говорят об условной вероятности безотказной работы в момент времени  $t_2$ , при условии, что в момент времени  $t_1$  РЭС была работоспособна.

По аналогии с (67) можно записать:

$$P(t_2, t_1) = \exp \left[ - \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \right]. \quad (68)$$

Если РЭС состоит из нескольких блоков, причём вероятность безотказной работы на интервале времени  $t$  равна  $P_i$ , а отказы статистически независимы, то для вероятности безотказной работы РЭС можно записать

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i \quad (69)$$

Следует отметить, что для оценки надёжности различных по назначению и требований, предъявляемых к РЭС, может быть использовано большинство законов распределения случайных величин удовлетворительно аппроксимирующих наблюдаемые процессы. С этой точки зрения наибольшее применение при оценки надёжности РЭС нашли следующие законы: Пуассона, биномиальный, экспоненциальный, Вейбулла, усечённый нормальный, логарифмический нормальный /14/.

Наиболее высокие требования к показателям надёжности предъявляются в том случае, если отказ РЭС может нанести ущерб здоровью или привести к гибели людей. Первоначально требования формулируются заказчиком при оформлении задания на разработку и в соответствии с государственными стандартами, окончательно устанавливаются на этапе технического предложения и могут уточняться на этапе эскизного проектирования. Если отказ РЭС не связан с опасностью для жизни и здоровья людей, то основным критерием оценки является экономическая эффективность функционирования, т.е. показатель надёжности необходимо выбирать такой, который минимизировал бы экономические потери.

#### 8.4. Классификация РЭС по показателям надёжности

Для оценки надежности все РЭС разбиты на следующие классы:

1. Неремонтируемая аппаратура, которая функционирует до первого отказа.
2. Ремонтируемая, невосстанавливаемая в процессе эксплуатации – аппаратура, восстановление которой в процессе эксплуатации невозможно.
3. Ремонтируемая, восстанавливаемая в процессе эксплуатации.

К неремонтируемой аппаратуре относятся практически все ЭРЭ, ИМС, микропроцессоры и т.д., а также РЭС, ремонт которых невозможен (например, аппаратура ИСЗ, находящегося на стационарной орбите).

К ремонтируемой аппаратуре, невосстанавливаемой в процессе эксплуатации, относится такая, перерывы в работе которой в процессе эксплуатации недопустимы (например, аппаратура для поддержания жизнедеятельности больного во время операции).

К ремонтируемой аппаратуре РЭА, восстанавливаемой в процессе эксплуатации, относится вся прочая аппаратура, ремонт которой может производиться в

процессе эксплуатации. При этом отказ может приводить как к частичной, так и к полной утрате функций РЭС на период восстановления.

## 8.5. Оценка надёжности неремонтируемых РЭС

Для оценки надёжности неремонтируемых РЭС можно непосредственно использовать формулы (60), (62), (67). В большинстве случаев используется экспоненциальный закон распределения времени наработки. При этом для вероятности безотказной работы РЭС справедлива формула

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \quad (70)$$

а для среднего времени безотказной работы  $T = \lambda^{-1}$ .

При наличии в составе  $n$  блоков (узлов) отказы которых происходят независимо, а вероятность безотказной работы каждого элемента  $p_i$  всего изделия находится как

$$P(t) = \prod_{i=1}^n p(i). \quad (71)$$

## 8.6. Оценка надёжности ремонтируемых РЭС

### 8.6.1. Ремонтируемые РЭС, невосстанавливаемые в процессе эксплуатации

Для этого класса РЭС в качестве показателей надёжности используются: вероятность безотказной работы, вероятность появления не более  $n$  отказов за время эксплуатации, средняя наработка на отказ.

Если для параметра потока отказов  $\omega(t)$

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(\Delta t)}{\Delta t}, \quad (72)$$

где  $P(\Delta t)$  – вероятность появления ровно одного отказа на малом интервале времени  $\Delta t$  и, полагая, что имеет место экспоненциальный закон распределения наработки между отказами, можно записать для вероятности безотказной работы такой РЭА на интервале времени  $(t_1, t_2)$

$$P(t_1, t_2) = \exp \left[ - \int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt \right]. \quad (73)$$

Вероятность  $P(t_1, t_2)$  того, что за период времени  $(t_1, t_2)$  появится  $n$  отказов, может быть вычислена с использованием среднего параметра потока отказов  $\varpi$ :

$$\varpi = (t_2 - t_1)^{-1} \int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt, \quad (74)$$

$$P(t_1, t_2) = \frac{[(t_2 - t_1)\varpi]^n}{n!} \cdot \exp[-\varpi \cdot (t_2 - t_1)]. \quad (75)$$

Если положить  $n=0$ , то (73), а это, как нетрудно убедиться, полностью совпадает с выражением для вероятности безотказной работы неремонтируемого РЭС. Более того, если поток отказов стационарный, то  $\omega(t) = \omega = \text{const}$ , а для экспоненциального распределения наработки между отказами  $\omega = \lambda = \text{const}$ .

### 8.6.2. Ремонтируемые РЭС, восстанавливаемые в процессе эксплуатации

Рассмотрим возможные состояния, в которых может находиться РЭС этого класса в период эксплуатации. Их два: работоспособное и неработоспособное. Тогда работоспособное состояние можно характеризовать вероятностью  $P_p(t)=K_e(t)$ , которое называется функцией готовности; неработоспособное состояние можно характеризовать вероятностью  $P_n(t)=K_n(t)$ , которая называется функцией простоты. Интенсивность отказов РЭС обозначим через  $\lambda$ , а интенсивность восстановлений через  $\mu$ . Тогда для нормального режима эксплуатации (когда  $t$  достаточно велико) функции  $K_e(t)$  и  $K_n(t)$  могут быть заменены коэффициентами готовности и простоты соответственно.

$$K_e(t) \approx k_e = \frac{\mu}{\lambda + \mu}; K_n(t) \approx k_n = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}. \quad (76)$$

Учитывая, что  $\lambda = \overline{T^{-1}}$  и вводя обозначение  $\mu = \overline{T_e^{-1}}$ , где  $\overline{T_e}$  – среднее время восстановления, можно записать:

$$k_e = \frac{\overline{T}}{\overline{T} + \overline{T}_B}; k_n = \frac{\overline{T}_B}{\overline{T} + \overline{T}_B}. \quad (77)$$

Функции готовности и простоты являются показателями надёжности ремонтируемых восстанавливаемых РЭС, знание которых даёт полную информацию о состоянии РЭС. Из определения самих функций следует, что

$$K_e(t) + K_n(t) = 1. \quad (78)$$

### 8.7. Оценка параметрической надёжности

Кроме внезапных отказов, характеризующихся скачкообразным изменением параметров РЭС, могут наблюдаться отказы, связанные с постепенным изменением свойств параметров. Такие отказы называют постепенными (параметрическими). Параметрические отказы обусловлены процессами деградации, старения, изнашивания, разрегулирования. При этом для такого вида отказов при нормальном законе распределения плотности вероятностей наработки до отказа /7/

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_t^\infty e^{-(t-t_{cp})^2/2\sigma^2}. \quad (79)$$

где  $\sigma^2$  – дисперсия средней наработки до отказа,  $t_{cp}$  – среднее время наработки до отказа.

### 8.8. Обеспечение надёжности РЭС на этапах проектирования

#### 8.8.1. Обеспечение надёжности РЭС на этапах схемотехнического проектирования

На этапе схемотехнического проектирования закладываются основы высокой надёжности будущих РЭС можно сформулировать несколько правил, которые позволяют выбрать правильный путь к достижению высокой надёжности.

1. Системный подход к проектированию РЭС – залог получения её высокой надёжности.

На этапе схемотехнического проектирования применение системного подхода позволяет установить взаимосвязи и взаимозависимости между подсистемами, входящими в РЭС, выявить особенности её функционирования и построить математическую модель РЭС. Наличие модели позволяет «проиграть» на ЭВМ различные варианты эксплуатации РЭС, а, следовательно, правильно прогнозировать и оценивать её надежность.

Сложность РЭС определяется, в первую очередь, алгоритмом функционирования, который предопределяет возможные технические решения.

Поэтому второе правило можно сформулировать так:

2. Выбирайте наиболее простой алгоритм функционирования РЭС, позволяющий получить требуемые результаты. Из возможных технических решений выбирайте наиболее простые, как наиболее надежные.

Развитие интегральной микроэлектроники показало, что она обеспечивает гораздо более высокую надежность РЭС, чем обеспечивали дискретные компоненты. Это следует из самих принципов построения и функционирования интегральных микросхем (ИМС), больших (БИС) и сверхбольших (СБИС) интегральных схем. Отсюда следующее правило:

3. При разработке новых схемотехнических решений используйте, преимущественно, достижения интегральной микроэлектроники.

4. Максимально используйте преимущества унифицированных и стандартизованных схемных решений.

5. Обеспечивайте номинальные режимы работы ЭРЭ. Очевидно, что если ЭРЭ будут работать с большей нагрузкой, это приведет к снижению надежности РЭС, увеличению интенсивности отказов и сокращению ресурса.

6. При разработке РЭС, к которому предъявляются особо высокие требования по надежности (медицинская, авиационная, космическая), применяйте резервирование.

### ***8.8.2. Обеспечение надёжности РЭС на этапах конструкторского проектирования***

Тепловая защита РЭС. В процессе работы элементы РЭС выделяют значительное количество тепла, которое, если не принять мер защиты, может привести к отказу аппаратуры и разрушению некоторых ЭРЭ. Так, например, современные ИКС характеризуются “плотностью упаковки”  $10^5+10^6$  активных элементов на кристалле. Если тепловая мощность каждого элемента составляет микроватты, то общая тепловая мощность одной ИМС будет составлять несколько ватт. В современной РЭС содержатся сотни и тысячи ИМС в одном изделии, что “обеспечивает” его тепловую мощность от десятков ватт до нескольких киловатт. При этом мы еще не учитывали тепло, выделяемое другими ЭРЭ.

В зависимости от функционального назначения РЭС выбираются способы его охлаждения. Например, бытовая аппаратура проектируется, как правило, с использованием естественного воздушного охлаждения, что ограничивает нижний предел производства таких ее параметров как выходная мощность на габариты. При проектировании промышленной РЭС широко используются естественное воздушное и жидкостное охлаждение. При использовании естественного охлаж-

дения важно выбрать такую конструкцию кожуха, которая обеспечивает равномерное обтекание воздуха всех охлаждаемых ЭРЭ и достаточную скорость воздушного потока. Ясно, что охлаждающий поток должен двигаться снизу вверх. Если естественного охлаждения недостаточно, то проектируют принудительное воздушное охлаждение, при котором осуществляется продувка через кожух РЭС определенных масс воздуха с требуемой скоростью. При этом разницу температур внутри блока РЭС и в окружающей атмосфере стремятся сделать как можно меньше.

В последние годы широкое применение для обеспечения нормальных тепловых режимов нашли тепловые трубы [2] – герметичные сосуды, в которых для отвода тепла используются испарительно–конденсационные процессы жидкости, находящейся внутри тепловой трубы и движущейся под действием капиллярных сил.

О качестве тепловой защиты РЭС судят по температуре, установившейся на поверхности теплонаагруженных и теплочувствительных элементов аппаратуры. Основные принципы обеспечения нормальных тепловых режимов работающего РЭС можно сформулировать в виде правил:

размещайте ЭРЭ, ИМС и другие теплонаагруженные и теплочувствительные элементы так, что бы они равномерно обтекались охлаждающим потоком;

не допускайте сосредоточения теплонаагруженных элементов РЭС в локальных объёмах, труднодоступных для охлаждающих потоков;

размещайте теплочувствительные элементы схем так, чтобы исключить влияние на них всех видов нагрева;

не размещайте бессистемно вентиляционные отверстия в кожухах блоков, так как это, как правило, ухудшает тепловые режимы РЭС;

используйте несущие элементы конструкции для стабилизации тепловых режимов РЭС.

Защита РЭС от механических воздействий. Важнейшим фактором, обеспечивающим высокую надежность РЭС, является обеспечение эффективной защиты от механических воздействий, к которым относятся вибрации, удары и линейные ускорения. При анализе механических перегрузок, действующих на аппаратуру, блок РЭС можно рассматривать как конструкцию, состоящую из балок (консолей) и пластин (платы, стенки кожуха), совершающих колебания вследствие действия приложенных сил. Вибрации испытывает практически любая аппаратура во время транспортировки и эксплуатации (особенно, установленная на подвижных объектах). При этом вибрационные ускорения могут достигать значений  $20g$ , что может привести к разрушению ЭРЭ и ИМС, сбои, изменения электрических параметров, резонансные явления. Для уменьшения влияния вибраций необходимо добиваться того, чтобы собственные резонансные частоты элементов конструкции РЭС лежали вне интервала возбуждающих частот. Если это достигнуто, то дальнейшее уменьшение влияния вибраций на РЭС достигается применением амортизаторов. Для правильного выбора системы амортизаторов рассчитываю, по стандартным методикам максимальную амплитуду колебаний блока, определяет жесткость амортизаторов и по справочным таблицам /2/ находят требуемый тип амортизаторов с учетом заданных ограничений. Ударные нагрузки действующие

на РЭС, могут создавать перегрузки до 100g, что требует принятия специальных мер для обеспечения надежности. При ударе в течение действия приложенной силы возникают вынужденные колебания блока РЭС, после прекращения действия силы-свободные колебания. В этом случае также рассчитываются максимальные перегрузки и возникающие деформации конструкции и, определив требуемую жесткость амортизаторов, выбирают их тип по таблицам. Линейные перегрузки, действующие на РЭС, не демпфируются амортизаторами, поэтому целесообразнее всего предусматривать жесткую фиксацию элементов конструкции для предотвращения отказов РЭС под действием линейных ускорений. Колебания, возникающие под действием скачка вынуждающей силы, демпфируются обычными амортизаторами с соответствующей жесткостью.

Существенно увеличивает надежность РЭС применение унифицированных и стандартизованных технических решений. Как правило, новое изделие является развитием накопленного разработчиками опыта, вследствие чего оно имеет более высокую надежность. За годы эволюции РЭС появились отработанные принципиальные электрические схемы различных устройств, которые могут использоваться в аппаратуре самого различного назначения.

Эти схемы тщательно отработаны, проверены в различных режимах работы, естественно, выше вероятность того, что они не преподнесут "сюрпризов". Например, ИМС массовых серий имеют множество модификаций, являющихся развитием предыдущих решений, и доведенных до высокого уровня надежности. Их применение позволяет создавать высоконадежные РЭС. Таких примеров можно найти множество.

Стандартизация закрепляет лучшие технические решения, многократно проверенные и рекомендованные для массового применения. Используя стандартные решения, мы используем лучшие технические решения, являющиеся обобщением опыта, накопленного в разных странах. Применение стандартных решений позволяет сократить время и стоимость разработки нового РЭС, повысить надежность, уменьшить разброс параметров; сократить номенклатуру применяемых ЭРЭ, ИМС, узлов и блоков, что дает дополнительный выигрыш по надежности. На этапе производства унификация и стандартизация позволяют за счет применения лучших технологических процессов сократить сроки производства и увеличить надежность.

### ***8.8.3. Резервирование РЭС***

В тех случаях, когда к РЭС предъявляются особенно высокие требования по надежности (например, бортовые РЭС) используется резервирование – применение дополнительных средств и (или) возможностей с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов. Другими словами, речь идет о введении информационной или аппаратурной избыточности для повышения надежности. Говоря в дальнейшем о резервировании, будем иметь в виду введение только аппаратурной избыточности. По структуре схем различают общее, раздельное (поэлементное) и смешанное резервирование.

Общее резервирование заключается в резервировании всего изделия в целом (т.е., например, передатчик резервируется таким же передатчиком). Раздель-

ное (поэлементное) резервирование заключается в резервировании отдельных блоков, узлов, элементов. Смешанное резервирование характеризуется тем, что наиболее ответственные блоки и узлы имеют общее резервирование, остальные – только поэлементное (т.е. у них резервируются только наиболее ответственные элементы).

Существуют две наиболее распространённые структурные модели для оценки надёжности резервированных РЭС: последовательная и параллельная. Для каждой из них существует своя система расчёта показателей надёжности. Ниже приведены формулы для наиболее часто встречающихся на практике случаев, когда все из  $n$  подсистем участвующих в резервировании РЭС имеют равные вероятности безотказной работы  $P_1(t)=P_2(t)=\dots P_n(t)$  на интервале времени  $(0, t)$ .

В последовательной модели основные и резервные элементы включены последовательно. Такое резервирование РЭС функционирует до тех пор, пока все элементы работоспособны. Основной эффект от резервирования в этом случае заключается в облегчении режима работы элемента. Расчётные формулы будут выглядеть следующим образом:

$$P(t) = P_i^n(t), \quad (80)$$

$$Q(t) = 1 - P_i^n(t). \quad (81)$$

Здесь и в дальнейшем  $n$  называют кратностью резервирования.

В параллельной модели надёжности основные и резервные элементы включены параллельно, а последовательно, такое РЭС функционирует до тех пор, пока хотя бы один из элементов сохраняет работоспособность. Сохраняя те же условия и обозначения, что и для последовательной модели, можно записать

$$P(t) = 1 - [1 - P_i(t)]^n, \quad (82)$$

$$Q(t) = [1 - P_i(t)]^n. \quad (83)$$

Следует отметить, что существуют и другие модели резервирования: замещением, скользящее постоянное, динамическое пассивное и прочие /12,13/ использующиеся на конкретных проектных решений РЭС.

Резервирование является более мощным средством повышения надёжности РЭС, однако при этом существенно возрастают стоимость, габариты, масса, потребляемая мощность. В этом случае необходимо использовать методы оптимального проектирования.

## 9. КОНТРОЛЬ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА РЭС

### 9.1. Качество. Основные понятия и определения

Качество любого изделия – это совокупность свойств этого изделия, обуславливающая возможность его применения, удовлетворяющую определенным требованиям потребителя.

Параметры объекта, характеризующего его качество, называют параметрами качества /16/.

Совокупность этапов проектирования изделия, изготовления и эксплуатации (рис.39) составляет жизненный цикл изделия, который все время повторяется.

Качество изделия, являясь его свойством, закладывается в изделие в процессе его проектирования и изготовления, а оценивается в процессе его эксплуатации. Однако обеспечение планируемого качества и соответствующая ему корректировка параметров качества на этапах проектирования и изготовления изделия требуют решения вопроса как обеспечения, так и контроля качества на всех трех этапах жизненного цикла изделия.

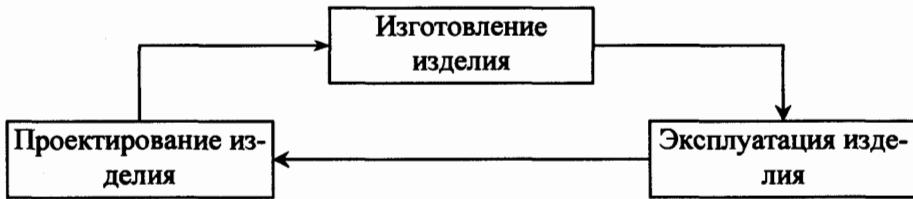


Рис.39. Этапы жизненного цикла изделия

Контроль качества осуществляется путем сравнения запланированного значения параметра качества с действительным показателем качества. Например, параметром качества изделия является его масса, а показателем его качества будет конкретное значение этой массы, записанное в нормативно-технической документации на изделие.

Собственно, контроль качества серийной продукции и состоит в том, чтобы, проверяя нужным образом подобранные выборочные данные (показатели качества), обнаружить отклонение параметров качества от запланированных значений, а при его возникновении найти причину его появления и после устранения его причины.

## 9.2. Статистический контроль качества

В 40-х годах правительства ряда высокоразвитых стран, побуждаемые необходимостью массового производства различной продукции в условиях второй мировой войны, стали широко внедрять контроль качества на предприятиях. Конечно, и до этого в структуре практически каждого предприятия имелись контрольные подразделения, например отделы контроля, которые и осуществляли функцию контроля качества продукции. Однако массовое производство изменило прежний подход к контролю мелкосерийной продукции, требовавшей проверки каждой единицы продукции, и привело к внедрению выборочного контроля с оценкой его результатов статистическими методами.

Современный контроль качества широко использует статистические методы и поэтому называется статистическим контролем качества [Statistical Quality Control (SQC)].

Контроль качества, базируясь на статистических методах и развиваясь циклически, проходит через определенные этапы (рис.40). Этот цикл называется циклом Деминга, а его реализация – оборотом Деминга.

Электронные средства характеризуются большим количеством и многообразием показателей качества, которые, в свою очередь, делятся на два основных класса: количественные показатели (физические, электрические, механические, химические величины); качественные показатели, оцениваемые не конкретными

значениями величины, а с помощью чувственных органов человека (зрительными органами, например, восприятие цвета; обонянием – восприятие запахов, и тому подобное).



Рис.40. Цикл Деминга

В целях уменьшения количества рассматриваемых показателей качества на практике широко применяется теория относительного качества, заключающаяся в том, что оценка качества на том или ином этапе жизненного цикла изделия дается в зависимости от назначения этого этапа. Так, например, на этапе проектирования рассматривается соответствие разрабатываемого изделия техническому заданию (ТЗ) и поэтому все многообразие показателей качества сводится к тому объему рассматриваемых показателей качества, которое записано в согласованном с заказчиком ТЗ; на этапе производства – соответствие изделия технологической документации для отдельной операции его изготовления; на этапе эксплуатации – соответствие изделия техническим условиям (ТУ).

Очевидным является тот факт, что не все параметры качества на этапах, предшествующих эксплуатации, в равной степени влияют на качество готового изделия в эксплуатации. А ведь именно обеспечение планируемого качества в эксплуатации изделия служит система управления качеством. Помимо того, не все показатели качества изделия в эксплуатации являются доминирующими.

Для выделения превалирующих показателей качества (контрлю и обеспечению уровня которых в системе управления качеством должно быть уделено первостепенное внимание) единичному показателю качества присваивает коэффициент весомости, значение которого устанавливается, как правило, априорно в зависимости от степени влияния того или иного показателя качества на качество готового изделия. Тогда, обозначив единичный показатель качества через  $b_i$ , а его коэффициент весомости через  $z_i$ , получим выражение для общего показателя качества готового изделия (или показателя качества на том или ином этапе его жизненного цикла):

$$z = \frac{b_1}{b} z_1 + \frac{b_2}{b} z_2 + \dots + \frac{b_i}{b} z_i + \dots + \frac{b_n}{b} z_n \quad (84)$$

где  $b = b_1 + b_2 + b_3 + \dots + b_n$ , а  $n$  – число рассматриваемых показателей качества.

В заключение данного раздела следует отметить, что управление качеством возможно только в том случае, если возможно управление факторами, воздействующими на рассматриваемый параметр качества. В то же время если исследуемый объект рассматривать в виде "черного ящика" (рис.41), то все разнообразие факторов, действующих на параметр качества ( $Y$ ) объекта, можно условно разбить на три самостоятельные группы.

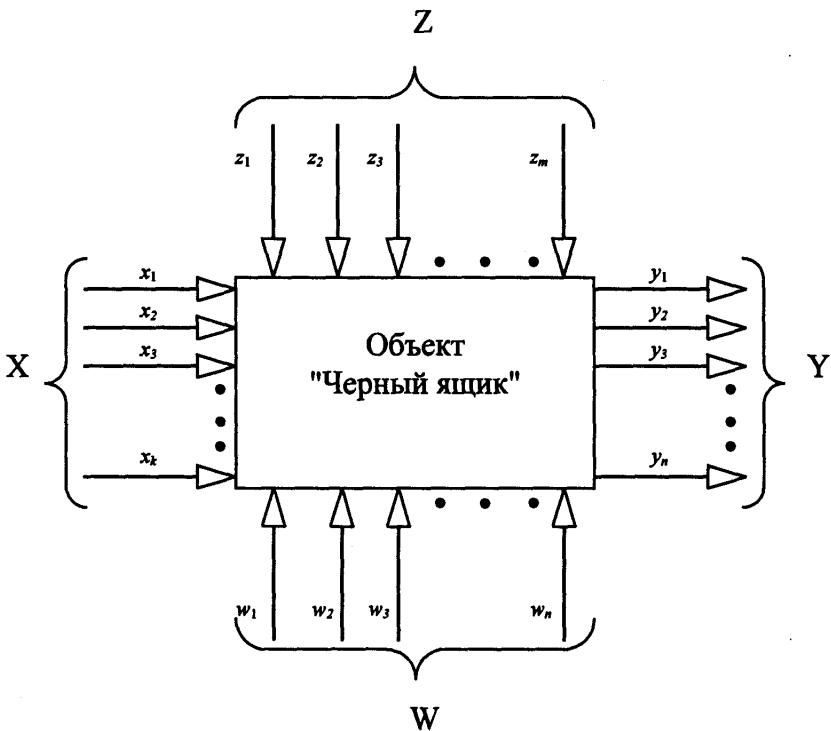


Рис.41. Схема процесса в виде "черного ящика"

Первая группа факторов составляет  $k$ -мерный вектор  $X$  входных управляемых параметров, то есть таких, которые можно измерять и целенаправленно изменять, поддерживая при этом заданные значения показателя качества  $Y$ . Вектор  $X$  называют вектором факторов; область его возможных значений  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$  – факторным пространством, а его составляющие  $\{X_i\}_{i=1}^{i=k}$  – факторами.

Вторая группа образует  $p$ -мерный вектор  $W$  контролируемых, но в рассматриваемой технологической операции неуправляемых параметров  $\{W_i\}_{i=1}^{i=p}$ , характеризующих состояние исходных факторов и качество объекта в целом (например, чистота исходного кремния при изготовлении микросхем).

Третья группа составляет  $m$ -мерный вектор  $Z$  неконтролируемых, а следовательно, и неуправляемых параметров  $\{Z_i\}_{i=1}^{i=m}$ . Сюда относятся параметры, оказывающие случайные возмущающие воздействия на качество объекта.

Очевидно, что выход системы  $Y$  может состоять из любого числа параметров качества  $\{Y_i\}_{i=1}^{i=n}$ , интересующих нас обычно не в одинаковой степени.

Система управления качеством рассматривает на каждом этапе жизненного цикла изделия (или отдельного периода цикла) только контролируемые и управляемые факторы, оказывающие влияние на параметры качества объекта управления.

Для анализа производственного процесса (при обеспечении и контроле его качества) последовательность технологических операций удобно представлять в виде схемы вероятностного процесса перехода от одной операции к другой, как это показано на рис.42.

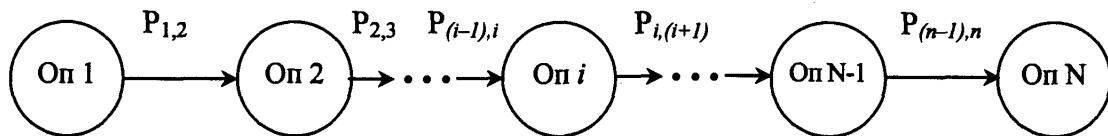


Рис.42. Вероятностная схема представления ТП

Величина вероятности ( $p_{1,2}, p_{2,3}, \dots, p_{(n-1),n}$ ) перехода от одной технологической операции ( $Op_1, Op_2, \dots, Op_N$ ) к другой определяется экспериментально как отношение числа годных изделий на выходе  $i$ -й технологической операции к общему числу изделий, поступивших на вход  $i$ -й операции.

Таким образом, управление качеством может производиться лишь в том случае, если задано требуемое значение параметра качества изделия на  $i$ -й операции  $x_{i_{\text{TP}}}$ , имеется его замеренное фактическое значение  $x_{i_{\text{ФАКТ}}}$ , а также известны управляемые параметры качества  $i$ -й технологической операции, при изменении которых можно получить необходимое значение  $x_{i_{\text{ФАКТ}}}$ .

С другой стороны, система вероятностного перехода от одной операции к другой позволяет выявить наиболее критичные (с точки зрения дефектности) технологические операции и на основании анализа дефектов на этих операциях принять меры к повышению их качества, а значит, и процента выхода годных изделий на этих операциях.

Аналогично можно формализовать и процесс контроля. Сущность его сводится к измерению фактических значений контролируемых параметров качества  $x_{i_{\text{ФАКТ}}}$ , сравнению  $x_{i_{\text{ФАКТ}}}$  с требуемым значением  $x_{i_{\text{TP}}}$ , оценке допустимости отклонений  $x_{i_{\text{ФАКТ}}} - x_{i_{\text{TP}}} = \Delta x$ . При этом на каждый контролируемый параметр  $X_i$  устанавливается допуск  $\varepsilon$ , чтобы отклонения фактических значений  $x_{i_{\text{ФАКТ}}}$  от требуемых находились в пределах допуска  $\pm \varepsilon$ , то есть

$$-\varepsilon \leq \Delta x \leq \varepsilon. \quad (85)$$

### 9.3. Прогнозирование параметров качества вероятностными и детерминистическими методами

Качество РЭС закладывается на стадиях проектирования и производства. При проектировании формируется система допусков на параметры материалов, технологические процессы, размеры деталей, сборочных единиц. Она должна быть построена так, чтобы на каждой стадии изготовления использованные материалы, детали и так далее с предусмотренными в документации отклонениями

параметров (допуски) и технологический процесс с присущими ему свойствами в части точности обеспечивали получение изделий со значениями параметров, определяющими заданный уровень качества РЭС.

Ниже будут описаны основные специфические вопросы производственной надежности, в первую очередь методы анализа отклонений и допусков, обеспечивающих выполнение указанных в ТЗ функций РЭС и, следовательно, обеспечивающих его необходимые качественные характеристики. Задача при этом состоит в том, чтобы учитывать влияние случайных отклонений параметров при изготовлении, что требует использования вероятностных методов /1/.

Для анализа отклонений и допусков может быть использована зависимость выходного параметра  $\alpha$ , отклонения и допуски которого анализируются, от значений первичных (входных) параметров  $\alpha_i$ , свойства которых получены при анализе производства на предшествующем иерархическом уровне РЭС. Предположим, что известна функция

$$\alpha = f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{N_{PM}}). \quad (86)$$

где  $N_{PM}$  – число первичных параметров, влияющих на  $\alpha$ .

Но реально  $\alpha_i$  есть случайные величины и могут быть известны только  $w(\alpha_1, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_{N_{PM}})$  и  $w(\alpha_i)$  или числовые характеристики  $M(\alpha_i)$  и  $D(\alpha_i)$ . При этом полезно получить  $w(\alpha)$ , что позволит найти вероятность выхода годных  $P_{год}$  и оценить допуски и серийнопригодность.

Однако строго теоретическое получение  $w(\alpha)$  при реальном виде функций  $f(\dots)$  и необходимости учета, влияния многих  $\alpha_i$  неосуществимо, так как при этом нужно выполнить функциональные преобразования совокупности случайных величин, что связано с нахождением интегралов и удается в очень редких случаях. Поэтому приходится применять приближенные методы, например, такие, как разложение функций в ряды; проведение активного эксперимента; использование метода Монте-Карло или имитационного моделирования (машинного эксперимента) на ЭВМ.

Конечно, возможен и прямой статистический эксперимент, когда изготавливается значительная партия изделий и для них измеряются значения  $\alpha_i$ . При этом элементы, входящие в это изделие, применяются так, чтобы их параметры отображали свойственное им рассеивание. Но изготовление партии изделий сопровождается значительными потерями времени и затратами на всех иерархических уровнях.

Следует отметить, что получение числовых характеристических функций совокупности случайных величин обычно связано с непреодолимыми трудностями, кроме частных случаев:

при

$$\alpha = \sum_{i=1}^{N_{PM}} \alpha_i$$

$$\begin{aligned} M(\alpha) &= \sum_{i=1}^{N_{PM}} M(\alpha_i), \\ D(\alpha) &= \sum_{i=1}^{N_{PM}} D(\alpha_i) + 2 \sum_{i=1}^{N_{PM}} R_{ij} D^{1/2}(\alpha_i) D^{1/2}(\alpha_j), \end{aligned} \quad (87)$$

где  $R_{ij}$  – коэффициент корреляции между значениями  $\alpha_i$  и  $\alpha_j$  первичных параметров.

При независимых  $\alpha_i$  и  $\alpha_j$

$$D(\alpha) = \sum_{i=1}^{N_{PM}} D(\alpha_i).$$

Относительное рассеивание

$$D(\alpha)/M^2(\alpha) = \sum_{i=1}^{N_{PM}} D(\alpha_i) / \left[ \sum_{i=1}^{N_{PM}} M(\alpha_i) \right]^2. \quad (88)$$

Для наглядного выявления важной закономерности рассмотрим частный случай, положив, что все  $\alpha_i$  имеют одинаковые  $D(\alpha_i)/M^2(\alpha_i)$ .

Тогда

$$[D(\alpha)/M^2(\alpha)] = (1/N_{PM}) [D(\alpha_1)/M^2(\alpha_1)]. \quad (89)$$

Следовательно, относительное рассеивание выходного параметра в (87) может уменьшаться по сравнению с относительным рассеиванием  $\alpha_i$ , что можно использовать в практике установления допусков.

При  $\alpha = \prod_{i=1}^{N_{PM}} \alpha_i$  и отсутствии зависимости  $\alpha_i$  и  $\alpha_j$

$$M(\alpha) = \prod_{i=1}^{N_{PM}} M(\alpha_i). \quad (90)$$

Для наглядности при вычислении  $D(\alpha)$  возьмем случай, когда учитываются два первичных параметра  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

$$D(\alpha) = D(\alpha_1)D(\alpha_2) + M^2(\alpha_1)D(\alpha_2) + M^2(\alpha_2)D(\alpha_1).$$

Относительное рассеивание приближенно, для  $[D(\alpha_i)/M^2(\alpha_i)] \ll 1$  запишем в общем виде

$$[D(\alpha_i)/M^2(\alpha_i)] \approx \sum_{i=1}^{N_{PM}} (D(\alpha_i)/M^2(\alpha_i)). \quad (91)$$

Для частного случая, когда рассеивания одинаковые, то есть  $D(\alpha_i)/M^2(\alpha_i) = D(\alpha_1)/M^2(\alpha_1)$ , получим

$$D(\alpha)/M^2(\alpha) = N_{PM} (D(\alpha_i)/M^2(\alpha_i)). \quad (92)$$

Следовательно, относительное рассеивание выходного параметра в (92) больше, чем первичных, что следует учитывать при анализе допусков.

Использование вероятностных методов при определении рассеивания и установлении допусков имеет большое значение для повышения эффективности производства, так как дает значительные преимущества по отношению к детер-

министическим методам, основанным на вычислении отклонений по максимальным и минимальным значениям.

При методе максимума–минимума выявляется такое сочетание максимальных отклонений  $\Delta\alpha_{i,\max}$ , которое приводит при простом суммировании их максимальных значений к максимальному и минимальному значениям  $\alpha$ . Вычисления при этом значительно упрощаются и не требуется знать закон распределения  $w(\alpha_i)$ ,  $M(\alpha_i)$  и  $D(\alpha_i)$ , нужно знать только допуски  $\pm\alpha_{i,\max}$ . Такой метод ранее часто использовался, особенно при анализе размерных цепей. Однако, как показано в работах /1,15/ он дает искаженные представления об отклонениях.

Детерминистический метод максимума–минимума дает завышение в  $\sqrt{N_{\text{ПМ}}}$  раз пределов отклонения выходного параметра и приходится, что не обосновано на практике, сужать допуски на все первичные параметры, усложняя этим изготовление.

Полученные результаты объясняются тем, что детерминистический метод максимума–минимума не учитывает того, что мала вероятность такой ситуации, когда во всех первичных параметрах наблюдается максимальное отклонение в невыгодную сторону. Причем эта вероятность тем меньше, чем больше  $N_{\text{ПМ}}$ .

#### **9.4. Управление качеством РЭС на предприятии**

Если все показатели качества контролируемого изделия систематизированы и осуществляется системный подход к обеспечению и контролю качества с целью анализа и управления составляющих качества на каждом этапе жизненного цикла изделия, то можно говорить о наличии системы управления качеством. Таким образом, система управления качеством рассматривает вопросы как обеспечения, так и контроля качества изделий в течение всего их жизненного цикла, начиная с момента составления технического задания и заканчивая рассмотрением претензий заказчика на готовую продукцию. Если в системе управления качеством для обеспечения контроля качества изделий на всех этапах его жизненного цикла применяется вычислительная техника (ЭВМ, микропроцессоры, вычислительные устройства), то говорят о наличии автоматизированной системы управления качеством.

Наиболее типичной организационной структурой является научно-производственное объединение, состоящее из предприятия, разрабатывающего ЭС, и завода-изготовителя.

Взаимосвязь подразделений единой службы управления качеством научно-производственного объединения как системы представлена на рис.43. Здесь объединены три самостоятельно действующие подсистемы:

подразделения, разрабатывающие ЭС; служба управления качеством и подразделения производства.

На всех предприятиях, выпускающих ЭС, отдел испытаний является необходимым звеном службы управления качеством, имитирующим сферу применения и эксплуатации продукции, и одним из основных объективных источников внутренней информации о фактическом качестве изделий. Эта информация позволяет установить более оперативную обратную связь в системе "качество готов-

вой продукции – проектирование и технологический процесс ее производства", чем в системе "изготовитель–потребитель–изготовитель". Основное требование к отделу испытаний – получение достоверной информации о соответствии изделий стандартам технических условий (ТУ) и нормативно-технической документации (НТД), на основании которой принимаются окончательные решения о приемке изделий, о доработках, о сроках разработок, освоении продукции и так далее. В связи с этим особо важное значение в работе отдела имеют организационные и технические мероприятия, направленные на обеспечение высокой надежности оборудования, соблюдение режимов испытаний.



Рис. 43. Структура единой службы управления качеством.

Испытательное оборудование и средства измерения должны иметь соответствующую эксплуатационную документацию (техническое описание, инструкцию по эксплуатации и другое) и периодически проверяются, как правило, силами отдела метрологии. Результаты периодических проверок испытательного и контрольно-измерительного оборудования предприятия заносятся отделом метрологии в специальные документы установленной формы, предназначенные для отметки технического состояния этого оборудования.

Особая роль в структуре службы управления качеством отводится отделу надежности. Этот отдел занимается не только разработкой и внедрением методов оценки надежности готовой продукции, но и вместе с разработчиками и изготовителями изделий участвует в разработке рекомендаций по повышению ее качества и надежности на основании проводимого анализа брака и отказов.

Главная задача отдела технического контроля (ОТК) – предотвращение дефектов и отклонений от установленных норм.

## 10. ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ТОЧНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

### 10.1. Производственные погрешности

Под точностью производства понимается степень соответствия выходных параметров изготовленного изделия их номинальным значениям, указанным в чертежах, схемах, технических условиях или другой документации. Это соответствие можно рассматривать в отношении размеров и формы отдельных деталей, упругих, электрических, магнитных и других свойств, а также качества поверхности и состояния поверхностного слоя. Причиной несоответствия являются неизбежные отклонения реального технологического процесса от расчетного (идеального). Такие отклонения называют первичными погрешностями /15/.

По характеру изменения в процессе производства погрешности разделяют на систематические постоянные, систематические переменные и случайные. Систематические погрешности возникают от действия факторов, принимающих вполне определенные значения. Постоянная систематическая погрешность при стабильных условиях принимает одно и то же значение по модулю и знаку, а переменная систематическая погрешность – закономерно изменяющиеся значения.

Случайные погрешности возникают от действия большого числа факторов, имеющих вероятностный характер. При одних и тех же условиях они принимают различные значения по модулю и знаку.

Случайные погрешности разделяют на дискретные и непрерывные. Дискретные случайные погрешности могут принимать в некотором интервале только целые значения, а непрерывные – любые значения. Например, число дефектных изделий в партии является дискретной случайной величиной, а выходной параметр изделия (линейный размер, напряжение и др.) – непрерывной случайной величиной.

Обеспечение необходимой точности производства является сложной задачей. Одним из средств достижения необходимого уровня точности производства являются расчет и анализ точности конструкций и технологических процессов. Такой анализ можно провести расчетно-аналитическим и статическим методами.

### 10.2. Расчетно-аналитический метод анализа точности производства

Расчетно-аналитический метод основан на установлении функциональных зависимостей между каждой первичной погрешностью и выходными параметрами точности.

В общем виде технологический процесс изготовления или сборки изделия может быть описан уравнением

$$y_0 = \varphi_0(x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}), \quad (93)$$

где  $y_0$  – выходной параметр точности технологического процесса;  $x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}$  – параметры технологического процесса (ноль в индексе указывает, что величины, входящие в уравнение (93), не имеют погрешностей).

Если параметры технологического процесса будут иметь отклонения (погрешности)  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$  от соответствующих номинальных значений, то выходной параметр получит отклонение  $\Delta y$ :

$$y = y_0 + \Delta y = \varphi(x_{01} + \Delta x_1, x_{02} + \Delta x_2, \dots, x_{0n} + \Delta x_n).$$

Разложим полученное выражение в ряд Тейлора, ограничиваясь членами первого порядка. Такое ограничение может быть принято, так как ошибки малы по сравнению со значением параметра

$$y \approx \varphi_0(x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}) + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial \varphi_0}{\partial x_i} \right) \Delta x_i.$$

Так как  $\Delta y = y - y_0$ , то

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial \varphi_0}{\partial x_i} \right) \Delta x_i,$$

где  $(\partial \varphi_0 / \partial x_i) = A_i$  – передаточное отношение или коэффициент влияния  $i$ -го аргумента на функцию

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n A_i \Delta x_i. \quad (94)$$

Для определения погрешности выходной параметр представим в виде явной функции параметров технологического процесса или комплектующих элементов (при сборке). Дифференцируя эту функцию по какому-либо аргументу, найдем коэффициент влияния и ошибку выходного параметра.

Для определения погрешности на выходе электрической цепи (рис. 44) представим выходной параметр в виде явной функции составляющих элементов:

$$U_{\text{вых}} = I_1 R_2; \quad I_1 = U_{\text{вх}} / (R_1 + R_2)$$

или

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} R_2 / (R_1 + R_2); \quad \varphi_0 = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = R_2 / (R_1 + R_2).$$

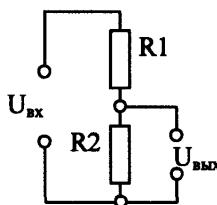


Рис. 44. Схема делителя напряжения

Коэффициент влияния определим по формулам

$$A_1 = \partial \varphi_0 / \partial R_1 = -R_2 / (R_1 + R_2)^2; \quad A_2 = \partial \varphi_0 / \partial R_2 = R_1 / (R_1 + R_2)^2.$$

Погрешность на выходе цепи

$$\Delta U_i = U_{\text{вх}} \sum_{i=1}^n A_i \Delta R_i.$$

Расчетно-аналитический метод обычно применяют для анализа технологического процесса и оценки влияния отдельных первичных погрешностей на выходные параметры точности. Реальные технологические процессы не могут быть достаточно полно отражены детерминированными моделями, и в большинстве случаев определить влияние всех многочисленных факторов на точность изготовления изделия этим методом не представляется возможным.

### 10.3. Статические методы анализа точности производства

Статические методы анализа технологических процессов основаны на положениях теории вероятности и математической статистики. Их применяют для анализа действующих технологических процессов и определения показателей точности и стабильности процессов путем образования выборок /15/.

Таблица 13

Интервалы, кОм		Середина интервала, кОм	Частота, $n_i$	Частость, $n_i/N$
свыше	до			
81	82	81.5	2	0.010
82	83	82.5	7	0.035
83	84	83.5	20	0.100
84	85	84.5	42	0.210
85	86	85.5	58	0.290
86	87	86.5	46	0.230
87	88	87.5	19	0.095
88	89	88.5	6	0.030
Сумма			200	1000

*Выборка.* Она должна быть репрезентативной (представительной), т.е. отражать все особенности общей совокупности.

Для определения влияния случайных факторов на качество изготовления изделия образуют мгновенные выборки из 5...20 деталей, последовательно изготовленных на одном технологическом оборудовании. Общая выборка состоит из 10 (или более) мгновенных выборок, взятых последовательно с одного оборудования (без его подналадки). По данной выборке определяют раздельно влияние случайных и систематических факторов без учета погрешностей настройки.

Совместное влияние случайных и систематических факторов (в том числе погрешностей настройки) определяют из случайно отобранных деталей, изготовленных при одной или нескольких настройках на одном оборудовании. Объем выборки составляет 50...200 деталей. Случайная погрешность графически характеризуется кривой распределения.

*Кривые распределения.* Практические кривые распределения строят следующим образом. Измеряют партию деталей (изделий) по параметру, точность которого надо определить. Результаты измерения записывают в порядке их получения в виде отклонений от номинального значения параметра или в виде фактических результатов измерения. Затем составляют таблицу распределения (табл. 13). Для этого результаты измерения объединяют в интервалы и подсчитывают

абсолютную частоту  $n_i$ , т.е. количество размеров или отклонений, находящихся в каждом интервале. В таблице распределения можно указывать не абсолютную частоту  $n_i$ , а относительную частоту (частость), т.е.  $n/N$ . Количество изделий  $N$  для построения кривых распределения следует брать не менее 100, а количество интервалов – не менее 7.

При определении границ интервалов принято начинать ряд, отступая примерно на 0.5 интервала в сторону меньших значений от наименьшего встретившегося значения, и заканчивать ряд, отступая примерно на 0.5 интервала в сторону наибольших значений от наибольшего встретившегося значения.

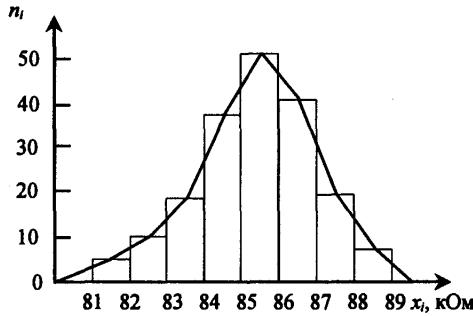


Рис. 45. Полигон распределения

На основании таблицы распределения строят полигон распределения. Для этого (рис. 45) по оси ординат откладывают абсолютную  $n_i$  (или относительную  $n/N$ ) частоту, а по оси абсцисс – середину интервала  $x_i$ . Соединяя точки пересечения прямыми, получим ломаную линию, которую называют также практической кривой распределения. Если увеличивать количество измеряемых изделий и число интервалов, то полученная ломаная линия в пределе превращается в кривую распределения.

Эмпирическое распределение может быть изображено в виде ступенчатого графика, называемого гистограммой распределения. Высоты прямоугольников гистограммы равняются частотам (частостям) распределения, а основания – интервалам.

Основными характеристиками эмпирического распределения являются среднее арифметическое значение  $\bar{x}$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma$ :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m x_i n_i; \quad (95)$$

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^m n_i (x_i - \bar{x})^2},$$

где  $n_i$  – частота;  $m$  – число интервалов (разрядов).

При расчете точности технологических процессов практические кривые заменяются теоретическими. В этом случае дифференциальный закон распределения случайных величин  $x$  в общем виде записывается так

$$y = \varphi(x), \quad (96)$$

где  $\varphi(x)$  – значение ординаты теоретической кривой распределения.

Характер распределения случайной величины, графически выражаемой кривой распределения, можно оценить двумя характеристиками: положением центра группирования отклонений и средним квадратическим отклонением от этого центра. Значение предельного отклонения в зависимости от значения среднего квадратического отклонения и закона распределения погрешностей.

*Закон нормального распределения.* Для описания производственных погрешностей наиболее часто используется закон нормального распределения.

Случайная погрешность подчиняется закону нормального распределения (закону Гаусса) при соблюдении следующих условий:

- 1) общая погрешность является суммой частных погрешностей, вызванных действием значительного числа случайных факторов;
- 2) все первичные случайные факторы по своему влиянию на общую погрешность одного порядка, т.е. среди них нет доминирующих;
- 3) все случайные факторы взаимно независимы (или малозависимы);
- 4) число случайных факторов и параметры вызванных ими частных погрешностей не изменяются во времени;
- 5) число систематических факторов и значения вызванных ими частных погрешностей остаются одинаковыми.

Многочисленными экспериментальными исследованиями установлено, что закону Гаусса с достаточным приближением следуют случайные ошибки измерений, выходные параметры функциональных элементов, размеры деталей, полученных обработкой на металлорежущих станках, и др.

Аналитическое выражение кривой распределения по закону Гаусса имеет вид

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma(x)\sqrt{2\pi}} e^{-[x-M(x)]^2/(2\sigma(x))^2}, \quad (97)$$

где  $\varphi(x)$  – плотность вероятностей, соответствующая абсциссе  $x$  ( $-\infty < x < \infty$ );  $e=2.7183$  – основание натуральных логарифмов;

$$\sigma(x) = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} [x - M(x)]^2 \varphi(x) dx}, \quad (98)$$

– среднее квадратическое отклонение аргумента (или стандарт распределения);

$$M(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \varphi(x) dx, \quad (99)$$

– математическое ожидание (среднее значение случайной величины).

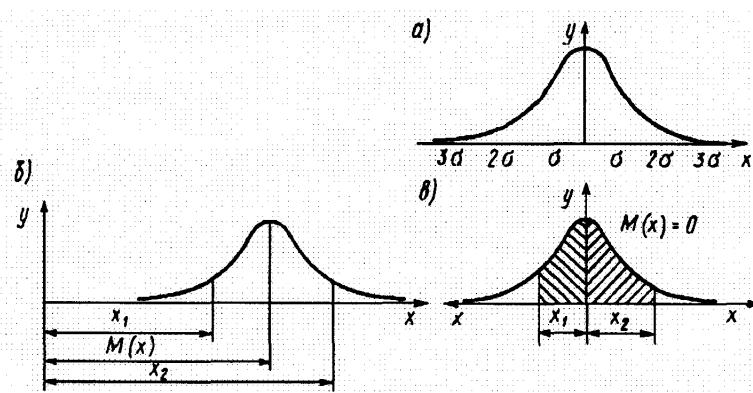


Рис. 46. Кривая нормального распределения (а),  
ее построение при  $M_x \neq 0$  (б), при  $M_x = 0$  (в).

Кривая распределения, соответствующая нормальному закону, симметрична относительно ординаты, проведенной в точке  $x=M(x)$ , и асимптотически сближается с осью  $x$  (рис. 46,а).

Такая форма кривой означает, что одинаковые положительные и отрицательные отклонения случайной величины от  $M(x)$  равновероятны; меньшие отклонения более вероятны; весьма большие отклонения маловероятны.

Максимальная ордината нормальной кривой имеет место при абсциссе  $M(x)$  и равна

$$y_{\max} = 1/(\sigma_i \sqrt{2\pi}) \approx 0,4/\sigma_i. \quad (100)$$

Точки перегиба лежат на расстояниях  $\pm\sigma$  от оси симметрии; их ординаты

$$y = y_{\max} / \sqrt{e} \approx 0,6 y_{\max}. \quad (101)$$

Форма и положение кривой нормального распределения определяется двумя характеристиками:  $M(x)$  и  $\sigma_i$ .

При изменении  $M(x)$  кривая, сохраняя свою форму, перемещается вдоль оси  $x$ , а при изменении  $\sigma_i$  меняется форма кривой распределения.

При больших значениях  $\sigma_i$  кривая будет пологой с большим полем рассеивания, а при малых значениях  $\sigma_i$  – сильно вытянутой вверх с малым полем рассеивания.

Часто гауссовское распределение применяют в нормированном виде. Нормирование распределения заключается в переходе от случайной величины к вспомогательной функции

$$Z = [x - M(x)]/\sigma_i, \quad (102)$$

для которой  $M(Z)=0$ ,  $\sigma_i=1$ . Плотность вероятности нормированной случайной величины  $Z$ , подчиняющейся закону Гаусса, имеет вид

$$\varphi(Z) = \frac{e^{-z^2/2}}{\sqrt{2\pi}}, \quad (103)$$

Площадь, ограниченная кривой нормального распределения и осью абсцисс, равна единице.

Таблица 14

Z	2Φ(Z)	Z	2Φ(Z)	Z	2Φ(Z)
0.0	0.00000	1.1	0.72867	2.2	0.97219
0.1	0.07966	1.2	0.76986	2.3	0.97855
0.2	0.15852	1.3	0.80640	2.4	0.98360
0.3	0.23582	1.4	0.83849	2.5	0.98758
0.4	0.31084	1.5	0.86639	2.6	0.99068
0.5	0.38292	1.6	0.89040	2.7	0.99307
0.6	0.45149	1.7	0.91087	2.8	0.99489
0.7	0.51607	1.8	0.92814	2.9	0.99627
0.8	0.57629	1.9	0.94257	3.0	0.99730
0.9	0.63188	2.0	0.95450	3.1	0.99806
1.0	0.68269	2.1	0.96427		

Практически пользуются конечными пределами, и вероятность  $P$  того, что отклонения погрешности (или параметра изделия) от среднего значения будут находиться в пределах  $x_1$  и  $x_2$  (рис. 46,б), равна

$$P(x_1 \leq x \leq x_2) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} e^{-\frac{(x_i - M(x))^2}{2\sigma_i^2}} dx$$

или

$$P(x_1 \leq x \leq x_2) = \Phi\left(\frac{x_2 - M(x)}{\sigma_i}\right) - \Phi\left(\frac{x_1 - M(x)}{\sigma_i}\right); \quad (104)$$

$$P(x_1 \leq x \leq x_2) = \Phi(Z_2) - \Phi(Z_1),$$

где  $\Phi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^Z e^{-z^2/2} dz$  – функция Лапласа или интеграл вероятностей.

В таблице 14 приведены значения функции Лапласа. Они представляют собой вероятность того, что отклонения от среднего значения случайной величины, выраженные в единицах среднего квадратического отклонения, будут находиться в пределах от  $-Z$  до  $+Z$ . Для отрицательных значений  $Z$  следует учитывать, что функция Лапласа является нечетной, т.е.  $\Phi(-Z) = -\Phi(Z)$ .

**Пример.** Определить процент изделий  $P_i$ , имеющих отклонение в пределах (рис. 46,в)  $x_1 = -0.03$  и  $x_2 = 0.05$ ;  $M(x)=0$ . Известно, что распределение погрешностей изделия подчиняется закону Гаусса и  $\sigma=0.02$  мм. Количество изделий, характеризуемое частью площади, лежащей слева от среднего арифметического, равно  $\Phi(Z_1)$ , а справа  $-\Phi(Z_2)$ :

$$Z1 = x1/\sigma = -0.03/0.02 = -1.5; \Phi(-1.5) = -0.4332;$$

$$Z2 = x2/\sigma = 0.05/0.02 = 2.5; \Phi(2.5) = 0.4938.$$

Используя формулу (104), получим  $P = (0.4938 + 0.4332) 100\% = 92.7\%$ .

С достаточной для практики точностью теоретическую кривую, имеющую пределы от  $-\infty$  до  $+\infty$ , заменим кривой, имеющей пределы  $\pm 3\delta$  от центра группирования. При  $x=\pm 3\delta$   $Z=3$ , в  $2\Phi(Z)=0.9973$ .

Вероятность того, что параметры детали (изделия) будут выходить за эти пределы, равна 0.0027. Практически эта вероятность равна нулю, и диапазон (поле) рассеяния погрешностей изготовления  $\omega$  можно определить по формуле

$$\omega_i = 6\sigma_i. \quad (105)$$

Точность технологического процесса при выполнении конкретной операции составляется с требуемой точностью путем сравнения поля допуска  $\delta_i$  с предельным практическим полем рассеивания для данного технологического процесса.

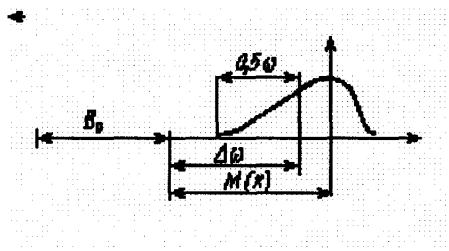


Рис. 47. Асимметричная кривая распределения:  $B_0$  – номинальный размер.

Технологический процесс обеспечивает требуемую точность, если  $\delta_i \geq \omega_i$ . При сопоставлении среднее значение должно совпадать с серединой поля допуска.

В практике встречаются законы распределения погрешностей, существенно отклоняющихся от закона нормального распределения. Для характеристики таких распределений введены коэффициенты относительной асимметрии и относительного среднего квадратического отклонения.

Коэффициент относительной асимметрии  $\alpha_i$  характеризует величину смещения центра группирования отклонений (рис. 47) от середины поля рассеяния:

$$\alpha_i = (M(x_i) - \Delta_{\omega_i}) / (0,5\omega_i),$$

где  $\Delta_{\omega_i}$  – координата середины поля рассеяния;  $\omega_i$  – поле рассеяния;  $M(x)$  – координата центра группирования (математическое ожидание).

Из формулы следует, что

$$M(x_i) = \Delta_{\omega_i} + 0,5\alpha_i\omega_i. \quad (106)$$

Коэффициент относительного среднего квадратического отклонения  $\lambda_i$  характеризует закон рассеяния номинальных размеров или их отклонений

$$\lambda_i = 2\sigma_i / \omega_i. \quad (107)$$

Для закона нормального распределения  $\alpha_i=0$ ,  $\lambda_i=1/3$ .

Суммарную погрешность технологического процесса находят на основании теорем теории вероятностей по следующим правилам.

- Величины, характеризующие центры группирования составляющих ошибок, складываются алгебраически, так как среднее значение суммы случайных величин равно сумме средних значений этих величин. На основании формулы (106)

$$\Delta_{\omega_\Delta} + 0,5\alpha_\Delta\omega_\Delta = \sum_{i=1}^n A_i(\Delta_{\omega_i} + 0,5\alpha_i\omega_i), \quad (108)$$

где  $A_i$  – коэффициент влияния (передаточное отношение). Индекс  $\Delta$  относится к величинам, характеризующим суммарную погрешность.

Координата середины поля рассеяния суммарной погрешности

$$\Delta_{\omega\Delta} = \sum_{i=1}^n A_i (\Delta_{\omega i} + 0,5\alpha_i \omega_i) - 0,5\alpha_\Delta \omega_\Delta. \quad (109)$$

- Величины, характеризующие рассеивание отклонений составляющей общей погрешности, суммируют квадратично, так как дисперсия суммы независимых случайных величин равна сумме дисперсий этих величин:

$$\sigma_\Delta^2 = \sum_{i=1}^n A_i^2 \sigma_i^2. \quad (110)$$

На основании уравнения (107)

$$\sigma_i^2 = (\lambda_i \omega_i / 2)^2.$$

Подставляя полученное значение в уравнение (110), получим

$$\lambda_\Delta \omega_\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 \lambda_i^2 \omega_i^2}.$$

Тогда поле рассеяния суммарной погрешности

$$\omega_\Delta = \frac{1}{\lambda_\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 \lambda_i^2 \omega_i^2}. \quad (111)$$

Наиболее широко применяют следующие статические методы расчета и анализа технологических процессов: метод кривых распределения и метод точностных диаграмм.

*Метод кривых распределения.* Метод является наиболее универсальным. С помощью данного метода можно исследовать точность получения заготовок, механической обработки и сборки, а также определить точность ряда специфических операций.

Кривую распределения можно рассматривать как объективную характеристику точности операции. Сопоставляя эти кривые, можно наглядно представить, как отражается изменение того или иного фактора на точности обработки, установить наличие доминирующих или систематических факторов, а также определить значения коэффициентов асимметрии и относительного рассеяния, необходимых для расчета размерных и кинематических цепей. Кривые распределения характеризуют точность законченного технологического процесса без учета последовательности изготовления деталей.

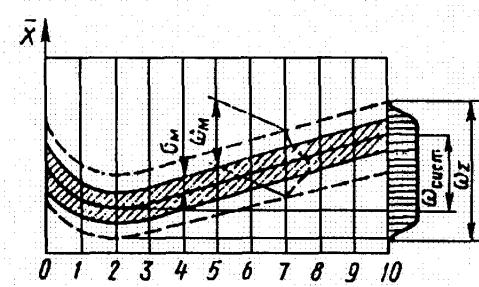


Рис. 48. Точностная диаграмма.

*Метод точностных диаграмм.* Метод используют для определения положения центра группирования и изменения мгновенного рассеяния отклонений параметров деталей во времени. На рис. 48 приведен пример теоретической точностной диаграммы. По оси абсцисс отложены номера последовательно взятых групп, а по оси ординат – вычисленные для каждой группы значения среднего арифметического  $x$ , мгновенного среднего квадратического отклонения  $\delta_m$  и предельных отклонений (верхнего и нижнего). Разность этих отклонений представляет собой поле мгновенного рассеяния  $\omega_m$ . Таким образом получаем характеристику изменения указанных величин во время протекания процесса обработки.

При построении точностных диаграмм число деталей в каждой группе рекомендуется брать равным 25.

## 11. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРОИЗВОДСТВА РЭС

### 11.1. Основные понятия и определения

Производственный процесс – совокупность всех действий людей и орудий производства, необходимых на данном предприятии для изготовления или ремонта выпускаемых изделий. Он включает подготовку производства; получение, транспортирование, контроль и хранение материалов (полуфабрикатов); технологические процессы изготовления деталей и сборки; изготовление технологической оснастки и др.

Производственный процесс делится на основной и вспомогательный. К основному производственному процессу относятся процессы изготовления продукции, предусмотренной планом; к вспомогательному – процессы изготовления оснастки, ремонта оборудования, энергоснабжения и др.

Цехи, в которых осуществляется основной производственный процесс, называются основными, а цехи, в которых реализуется вспомогательный производственный процесс, – вспомогательными (ремонтный, инструментальный и др.).

Технологический процесс – часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и(или) последующему определению состояния предмета труда. К предметам труда относятся заготовки и изделия.

Основной частью технологического процесса является технологическая операция – законченная часть технологического процесса, выполняемая непрерывно на одном рабочем месте.

Примеры технологических операций: сверление отверстий в печатных пластинах, вжигание толстопленочных резисторов, термотренировка интегральных схем и др.

Основными элементами технологических операций являются установ, технологический переход (переход), вспомогательный переход, рабочий ход, вспомогательный ход и позиция.

Установ – часть технологической операции, выполняемая при неизменном закреплении обрабатываемых заготовок или собираемой сборочной единицы.

Переход – законченная часть технологической операции, выполняемая одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах и установке.

Вспомогательный переход – законченная часть технологической операции, состоящая из действий человека и(или) оборудования, которые не сопровождаются изменением свойств предметов труда, но необходимы для выполнения технологического перехода. Например, закрепление заготовки, смена инструмента и т.д.

Рабочий ход – законченная часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, сопровождающего изменением формы, размеров и качества поверхности или свойств заготовки.

Вспомогательный ход – законченная часть технологического перехода, состоящего из однократного перемещения инструмента относительно заготовки и необходимого для подготовки рабочего хода.

Позиция – фиксированное положение, занимаемое неизменно закрепленной обрабатываемой заготовкой или собираемой сборочной единицей совместно с приспособлением относительно инструмента или неподвижной части оборудования для выполнения определенной части операции. Например, обработка в поворотном приспособлении.

Построение технологического процесса и степень его детализации зависят от типа производства – единичного, серийного и массового.

Единичное производство характеризуется малым объемом выпуска одинаковых изделий, повторное изготовление и ремонт которых, как правило, не предусматриваются.

Серийное производство характеризуется изготовлением или ремонтом изделий, периодически повторяющимися партиями. В зависимости от количества изделий в партии различают мелкосерийное, среднесерийное и крупносерийное производство.

Массовое производство характеризуется большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавляемых или ремонтируемых продолжительное время, в течение которого на большинстве рабочих мест выполняется одна рабочая операция.

Важной характеристикой является коэффициент закрепления операции

$$K_{з.о.} = \frac{O}{P}, \quad (112)$$

где  $O$  – число различных технологических операций, выполненных или подлежащих выполнению в течение месяца;  $P$  – число рабочих мест.

При  $K_{з.о.} = 20\dots40$  производство мелкосерийное; при  $K_{з.о.} = 10\dots20$  – среднесерийное, при  $K_{з.о.}$  выше 1...10 – крупносерийное. Для единичного производства  $K_{з.о.}$  не регламентируется; для массового производства  $K_{з.о.} = 1$ .

Программа выпуска в массовом производстве обеспечивает возможность узкой специализации рабочих мест, за которыми закрепляется выполнение только одной операции.

Технологичность конструкции РЭС – сочетание конструктивно-технологических требований, обеспечивающих простое и экономичное производство изделий.

Забота об обеспечении технологичности изделия возлагается на конструктора, начиная с момента проектирования на первом этапе: определение прочности

и жесткости элементов, надежности, эластичности. На втором этапе: рассчитываются материалы, определяются допуски. На третьем этапе: вопросы, связанные с экономией материалов, удобством сборки и т.д.

Обеспечение технологичности РЭС связано с вопросами рациональной компоновки элементов изделия, простотой решения отдельных узлов, соблюдением правил промышленной эстетики.

Эти работы предусматривают унификацию и стандартизацию элементов конструкции, анализ технологичности отдельных сборочных единиц.

Многоэтапность технологического процесса заставляет анализировать технологичность изделия на каждом этапе: анализируется для опытного образца, для установочной серии, серийного производства. Определяя показатель технологичности технологии, разбивают сборочные единицы на отдельные группы (электронные блоки, механические, радиоэлектронные, коммутационно-распределительные).

## **11.2. Оценка технологичности конструкций РЭС**

Технологичность конструкции является одной из важнейших характеристик изделия. Под технологичностью изделия понимают совокупность свойств конструкции изделия, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, эксплуатации и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ.

Различают производственную и эксплуатационную технологичность. Производственная технологичность конструкции изделия проявляется в сокращении затрат средств и времени на конструкторско-технологическую подготовку производства и процессы изготовления, включая контроль и испытания; эксплуатационная технологичность – в сокращении затрат времени и средств на техническое обслуживание ремонт изделия.

Требования, предъявляемые к технологичности конструкции, меняются в зависимости от вида изделия, объема выпуска и типа производства. Изделие, технологичное в условиях мелкосерийного выпуска, может оказаться нетехнологичным при массовом изготовлении. Наиболее целесообразным является отработка технологичности конструкции во время ее проектирования.

Технологичность конструкции изделия можно оценить количественно и качественно.

Качественная оценка характеризует технологичность конструкции обобщенно на основании опыта исполнителя. Такая оценка допустима на всех стадиях проектирования, когда осуществляется выбор лучшего конструктивного решения и не требуется определения степени технологичности сравниваемых вариантов. Качественная оценка в процессе проектирования предшествует количественной и определяет целесообразность ее проведения.

Количественная оценка осуществляется с помощью системы базовых показателей.

По способу выражения характеризуемых признаков показатели технологичности могут быть абсолютные и относительные, а по количеству признаков – частные и комплексные. Частный показатель технологичности конструкции изделия

характеризует одно из входящих в нее свойств, а комплексный показатель – несколько входящих в него частных и комплексных свойств.

Базовые показатели технологичности для электронных блоков, определяемые на стадии разработки рабочей документации, их ранжированная последовательность по весовой значимости приведены в табл. 15.

Значения базовых показателей применяются в пределах  $0 < K_i < 1$ . Увеличение показателя соответствует более высокой технологичности изделия.

Таблица 15

Порядковый номер в ранжированной последовательности $i$	Показатели технологичности	Обозначение	Коэффициент $\varphi_i$
1	Коэффициент использования микросхем и микросборок в блоке	$K_{\text{ИМС}}$	1.000
2	Коэффициент автоматизации и механизации монтажа	$K_{\text{А.М}}$	1.000
3	Коэффициент автоматизации и механизации подготовки ЭРЭ	$K_{\text{М.П.ЭРЭ}}$	0.750
4	Коэффициент автоматизации и механизации операций контроля и настройки	$K_{\text{М.К.и}}$	0.500
5	Коэффициент повторяемости ЭРЭ	$K_{\text{Пов ЭРЭ}}$	0.310
6	Коэффициент применяемости ЭРЭ	$K_{\text{П ЭРЭ}}$	0.187
7	Коэффициент прогрессивности формообразования деталей	$K_{\Phi}$	0.110

Коэффициент  $\varphi_i$  зависит от порядкового номера основных показателей технологичности, ранжированная последовательность которых устанавливается эксперты путем

$$\varphi = i / 2^{i-1}, \quad (113)$$

где  $i$  – порядковый номер показателя в ранжированной последовательности.

Частные показатели технологичности, приведенные в таблице, определяются отношениями: в числителе – количество ЭРЭ, монтажных соединений и проч., что по подготовке к установке, изготовлению, операциям поддается автоматизации, в знаменателе – общее число ЭРЭ, монтажных соединений, деталей и т.п. в изделии /15/.

Основным показателем, используемым для оценки технологичности конструкции, является комплексный показатель технологичности конструкции изделия

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n K_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^n \varphi_i} = \frac{K_1 \varphi_1 + K_2 \varphi_2 + \dots + K_n \varphi_n}{\varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n}, \quad (114)$$

где  $K_i$  – значение показателя, определяемого по таблице состава базовых показателей;  $\varphi$  – коэффициент, нормирующий весовую значимость показателя в зависимости от его порядкового номера в таблице;  $n$  – общее количество частных показателей;  $i$  – порядковый номер показателя в ранжированной последовательности.

Уровень технологичности конструкции изделия при известном нормативном показателе  $K_n$  оценивается отношением полученного комплексного показателя к нормативному, которое должно удовлетворять условию

$$K/K_n \geq 1.$$

Нормативное значение показателя  $K_n$  конструкций блоков РЭС для условий серийного производства составляет 0.5–0.8, а для опытного производства – 0.4–0.7.

### 11.3. Автоматизация технологических процессов

В течение длительного времени основным направлением комплексной автоматизации в массовом производстве являлось создание специального оборудования: автоматов и полуавтоматов, автоматических и поточных линий. Такое оборудование, как правило, не переналаживается.

Серийное и мелкосерийное производство базируется на универсальном неавтоматизированном оборудовании, которое имеет низкую производительность, но может быстро переналаживаться. Преобладание универсального оборудования ограничивает возможности автоматизации, так как при частой смене выполняемых операций возникают большие потери времени из-за переналадок.

Наиболее перспективным направлением автоматизации в серийном производстве является широкое внедрение оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), в том числе многоцелевых станков типа "обрабатывающий (сборочный) центр", которые взаимодействуют с промышленными роботами (ПР), управляемыми от ЭВМ.

Основное преимущество станков с ЧПУ – высокая производительность за счет сокращения вспомогательного времени, интенсификации режимов резания и возможности быстрой переналадки. Наиболее эффективно использование станков с ЧПУ при обработке деталей сложной конфигурации, контуры которых содержат криволинейные участки, конусные поверхности у тел вращения, плоские поверхности, не параллельные друг друга.

Большинство станков в ЧПУ обеспечивает точность перемещения  $\pm(0.01–0.03)$  мм при скорости 15–25 мм/с.

Промышленный робот – это автоматическая машина, стационарная или передвижная, состоящая из исполнительного устройства в виде манипулятора, имеющего несколько степеней подвижности и программируемого устройства. Один промышленный робот при двухсменной работе заменяет от двух до четырех рабочих. Системы управления промышленными роботами подразделяются на биотехнические (с ручным управлением), интерактивные (со смешанным управлени-

ем) и автоматические. Рабочими органами промышленных роботов служат захватывающее устройство, сборочный инструмент и др.

Гибкая производственная система (ГПС) представляет собой совокупность в разных сочетаниях оборудования с ЧПУ, роботизированных технологических комплексов (совокупности единицы технологического оборудования, промышленного робота и средств оснащения, автономно функционирующую и осуществляющую многократные циклы), отдельных единиц технологического оборудования и систем обеспечения их функционирования в автоматическом режиме в течение заданного времени, обладающую свойством автоматизированной переналадки при производстве изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик.

Целесообразно рассматривать структурную и технологическую гибкость.

Структурная гибкость предусматривает выбор последовательности обработки или сборки, наращивание системы на основе модульного принципа и выполнение работы на аналогичном оборудовании при выходе из строя любой из единиц оборудования, входящих в систему.

Технологическая гибкость определяется по способности выполнять на имеющемся оборудовании обработку группы различных деталей без переналадки или с незначительными переналадками (не чаще 1 – 3 раза в месяц).

Наибольшее развитие ГПС получили в механообработке и значительно меньшее – в сборочных процессах. ГПС занимают промежуточное значение между жесткими автоматическими линиями станков для производства больших партий однотипных деталей и универсальным оборудованием, обслуживаемым высококвалифицированными рабочими, в условиях единичного производства.

При переходе к ГПС эффективность использования оборудования повышается в 2 – 3 раза за счет сокращения времени на переналадку. Коэффициент использования машинного времени станков повышается до 0.85–0.9 (по сравнению с 0.4–0.6), а цикл обработки деталей сокращается в 6 – 10 раз. Однако создание ГПС связано со значительными затратами и во всех случаях необходимо оценивать технико-экономическую и организационную эффективность их внедрения.

Для контроля в ГПС используют контрольно-измерительные машины, управляемые от ЭВМ.

Показателями экономической эффективности от внедрения ГПС являются:  
коэффициент окупаемости,  
годовой экономический эффект,  
коэффициент повышения производительности труда,  
коэффициент приращения стоимости обработки продукции на одного работающего,

фондоотдача.

Эффективность оценивается:

коэффициентом использования оборудования,  
коэффициентом сменности и загрузки оборудования,  
коэффициентом гибкости,  
показателями надежности.

#### **11.4. Контроль технологических процессов**

Неотъемлемой составной частью технологического процесса является технический контроль, который должен охватывать весь технологический процесс и предотвращать попадание дефектных материалов и изделий на последующие этапы изготовления или ремонта.

На этапе изготовления устанавливают три вида контроля: входной, операционный и приемочный.

Входной контроль используют для проверки соответствия материалов, заготовок, комплектующих изделий и сборочных единиц, поступающих на предприятие; операционный контроль – для проверки деталей и сборочных единиц в процессе изготовления или ремонта, а также количественных и качественных характеристик технологических процессов; приемочный контроль – для проверки соответствия качества готовых изделий требованиям, установленным в нормативно-технической документации.

Контроль может быть сплошной, выборочный, непрерывный, периодический, летучий.

Сплошной контроль применяют в условиях высоких требований к уровню качества изделий, у которых абсолютно недопустим пропуск дефектов в дальнейшее производство или эксплуатацию.

Выборочный контроль используют для изделий при большой трудоемкости контроля или при контроле, связанном с разрушением изделий или с операциями, выполняемыми на автоматизированных комплексах.

Непрерывный контроль служит для проверки технологических процессов при их нестабильности и необходимости постоянного обеспечения количественных и качественных характеристик. Непрерывный контроль, как правило, осуществляется автоматическими или полуавтоматическими методами контроля.

Периодический контроль применяют для проверки изделий при установившемся производстве и стабильных технологических процессах.

Летучий контроль применяют в специальных случаях, установленных стандартами предприятия.

Выбор средств контроля должен быть основан на обеспечении заданных показателей процесса контроля и анализа затрат на реализацию его процесса в установленный промежуток времени при заданном качестве изделия.

Обязательными показателями процесса контроля являются точность измерений, достоверность, трудоемкость и стоимость контроля.

При выборе средств контроля должно обеспечиваться оптимальное применение прогрессивных механизированных и автоматизированных, универсальных и стандартных средств контроля; повышение производительности и снижение трудоемкости контроля и безопасность труда.

#### **11.5. Технологический процесс изготовления печатных плат**

Помимо рассмотренных выше общих принципов проектирования технологических процессов, радиоинженеру необходимо знать частные методы разработки технологий процессов, без которых квалифицированное конструирование РЭС невозможно.

Одним из важных и наиболее часто встречающихся технологических процессов при производстве РЭС является процесс изготовления печатных плат. Применение печатных плат позволяет механизировать и автоматизировать сборку РЭС, повысить их надежность, обеспечить повторяемость монтажа от изделия к изделию.

Печатной платой называется материал основания, вырезанный по размеру, содержащий необходимые отверстия и проводящий рисунок. Основными видами печатных плат являются односторонние печатные платы (ОПП), двусторонние (ДПП), многослойные (МПП), гибкие печатные платы (ГПП) и гибкие печатные кабели (ГПК).

Материалами для печатных плат служат слоистые прессованные пластики (гетинакс или стеклотекстолит), пропитанные искусственной смолой и облицованые с одной или с двух сторон медной электрической фольгой толщиной 18, 35, 50 мкм.

Весьма ответственным этапом изготовления печатных плат является их механическая обработка. Основными этапами механической обработки являются: входной контроль материала, заключающийся в проверке состояния поверхности листа, прочности сцепления фольги, поверхностного сопротивления и др.; получение заготовки – разрезкой листа дисковой фрезой или на гильотинных ножницах с оставленным на заготовке припуском; сверление монтажных отверстий (пробитые отверстия имеют плохое качество поверхности и непригодны для металлизации); обработка по контуру вырубкой или фрезерованием после изготовления печатных проводников.

Основными методами получения проводящего рисунка печатной платы является фотопечать и трафаретная печать.

Фотопечать представляет собой способ нанесения изображения рисунка печатных проводников на материал основания, покрытый светочувствительным слоем (фоторезистом), экспонируемым через фотошаблон с требуемым изображением. Фотошаблон рисунка печатной платы это негативное или позитивное изображение рисунка печатной платы в масштабе 1:1 на стеклянной фотопластине или пленочном материале, полученное путем фотографирования с оригиналов рисунка печатной платы.

Сеткографический метод (трафаретная печать) основана на получении необходимого рисунка схемы на поверхности фольги путем продавливания защитной краски резиновым ракелем через сетчатый трафарет. Открытые участки сетки трафарета соответствуют рисунку печатной платы.

Получение рисунка методом трафаретной печати на 60 % дешевле, чем фотохимическим.

Технологические процессы изготовления печатных плат можно разделить на субтрактивные, аддитивные и полуаддитивные /15/.

Субтрактивный процесс получения проводящего рисунка заключается в избирательном удалении участков проводящей фольги путем травления; аддитивный процесс – избирательном осаждении проводящего материала на нефольгированный материал основания; полуаддитивный процесс предусматривает предва-

рительное нанесение тонкого (вспомогательного) проводящего покрытия, в последствии удаляемого с пробельных мест.

Схема технологического процесса изготовления печатной платы химическим методом изображена на рис. 49.



Рис. 49. Схема типового технологического процесса изготовления печатной платы химическим методом

В соответствии с ГОСТ 23751–86 конструирование печатных плат следует осуществлять с учетом следующих методов изготовления: химического для ОПП, ГПК; комбинированного позитивного (для ДПП, ГПП); электрохимического (полуаддитивного) для ДПП; металлизации сквозных отверстий для МПП. Все рекомендуемые методы (кроме полуаддитивного) являются субтрактивными.

Химический метод, или метод травления фольгированного диэлектрика, заключается в том, что на медную фольгу, приклеенную к диэлектрику, наносят позитивный рисунок схемы проводников. Последующим травлением удаляется ме-

талл с незащищенных участков и на диэлектрике получается требуемая электрическая схема проводников.

Наиболее распространенными вариантами этого метода являются фотохимический и сеточно-химический, которые отличаются способом нанесения защитного слоя (фотопечать или трафаретная печать). Схема типового технологического процесса изготовления печатных плат химическим методом показана на рис. 49.

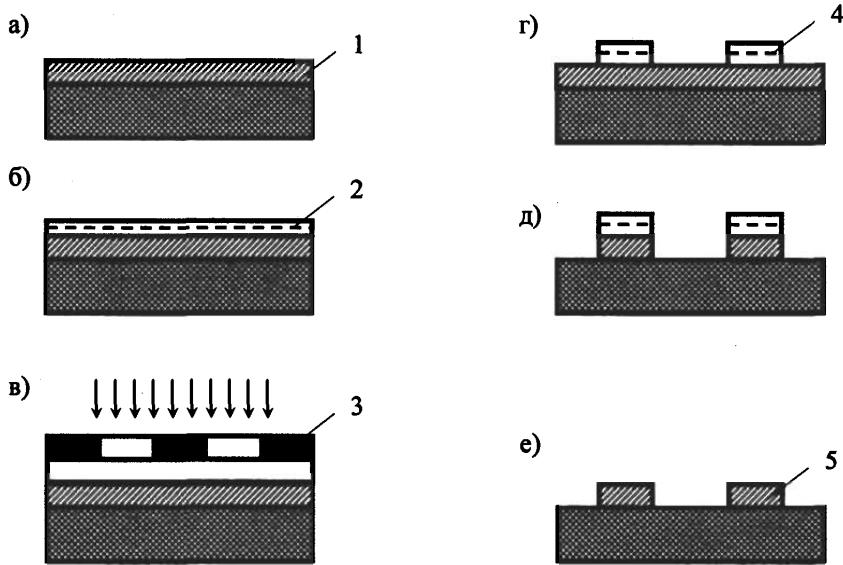


Рис. 50. Основные этапы получения проводников  
фотохимическим методом.

Основными этапами получения проводников являются (рис. 50): а – подготовка поверхности, б – нанесение слоя фоторезиста, в – экспонирование, г – проявление схемы, д – травление фольги, е – удаление фоторезиста.

Электрохимический (полуаддитивный) метод применяют для изготовления ДПП с высокой плотностью токопроводящего рисунка на нефольгированном диэлектрике. Разрешающая способность этого метода выше, чем комбинированного позитивного, что объясняется малым боковым подтравливанием, которое равно толщине стравливаемого слоя, а при полуаддитивном методе составляет всего 5 мкм. Метод обеспечивает высокую точность рисунка, хорошее сцепление проводников с основанием и устраняет неоправданный расход меди, который доходит до 80 % при использовании фольгированных диэлектриков.

Метод металлизации сквозных отверстий применяют для изготовления МПП (рис. 51).

Основные операции технологического процесса получения печатных проводников методом металлизации сквозных отверстий показаны на рис. 52.

Метод металлизации сквозных отверстий с внутренними переходами отличается от рассмотренного выше наличием дополнительных операций, связанных со сверлением отверстий в отдельных слоях платы или сквозных, позволяющих после их металлизации производить электрическую коммутацию между любыми слоями проводящего рисунка МПП.

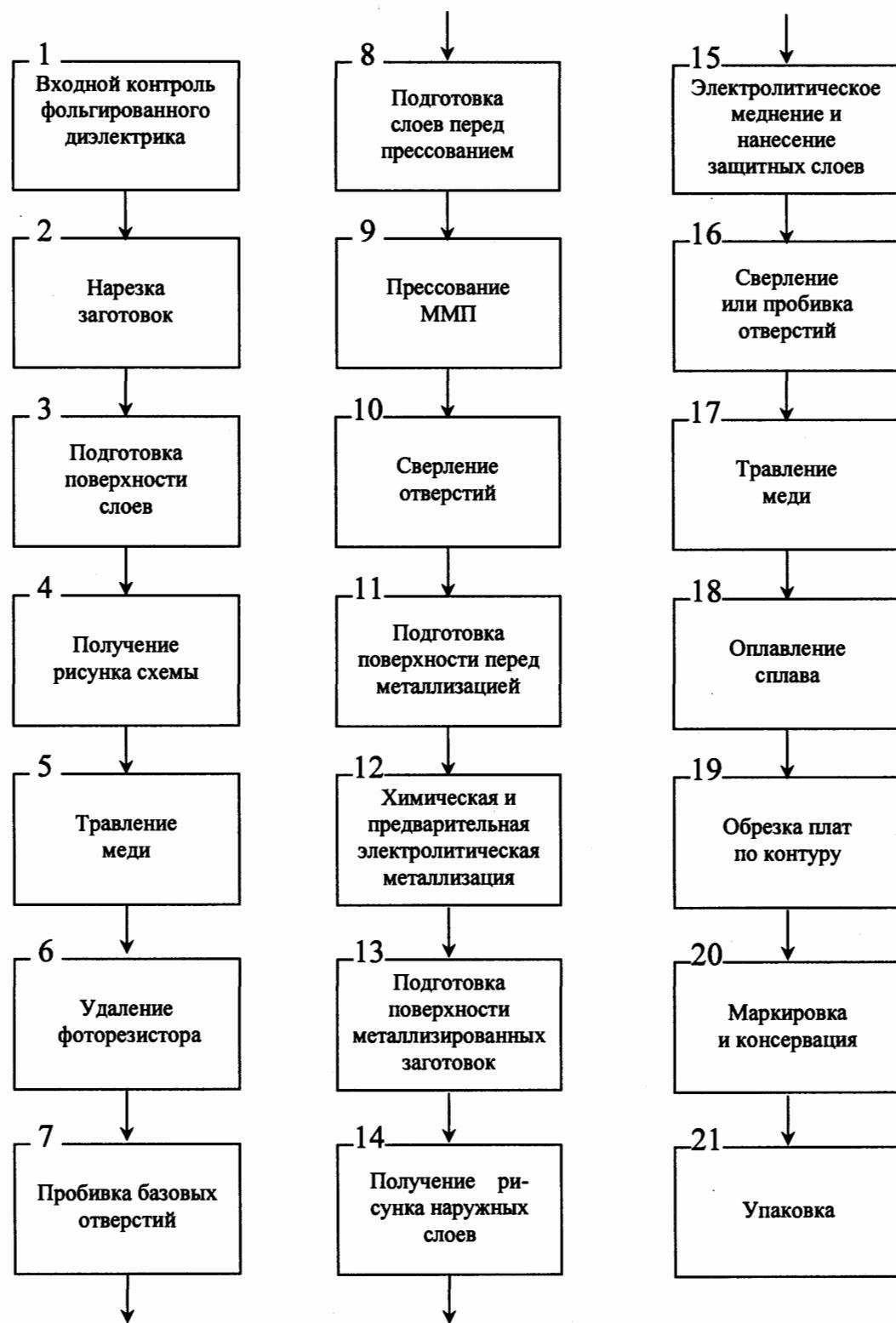


Рис. 51. Схема типового технологического процесса изготовления МПП методом металлизации сквозных отверстий.

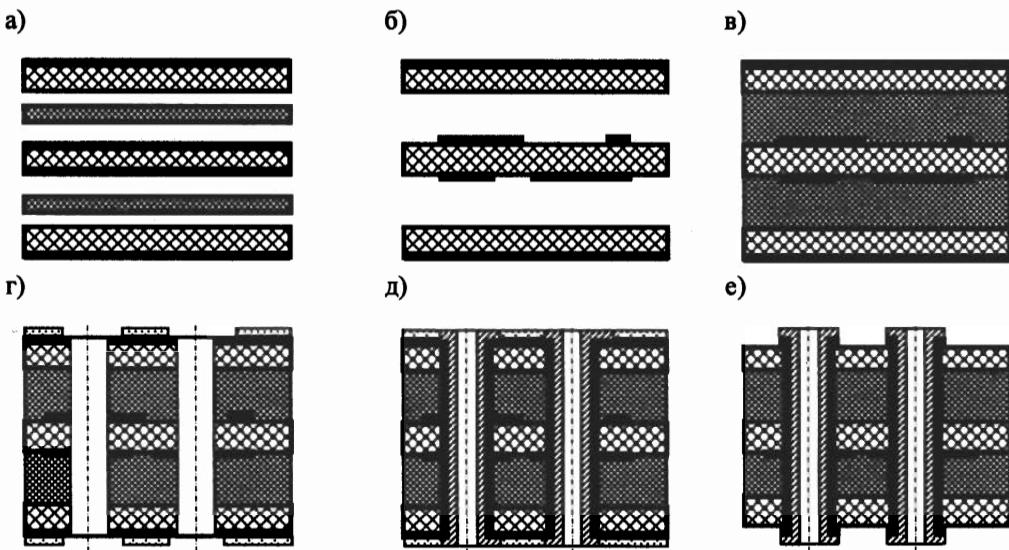


Рис. 52. Основные этапы получения печатных проводников МПП:

а – изготовление заготовок фольгированного материала и стеклоткани;

б – получение рисунка схемы внутренних слоев; в – прессование многослойной печатной платы; г – сверление отверстий, предварительная металлизация, получение рисунка схемы наружных слоев МПП; д – окончательная металлизация отверстий, нанесение защитного покрытия; е – травление меди с пробельных мест.

В заключение следует отметить, что технологический процесс изготовления печатных плат субтрактивными методами имеет ряд недостатков: значительный расход медной фольги; боковое подтравливание, ухудшающее механические и электрические характеристики печатных плат; высокая трудоемкость изготовления и ограниченные возможности повышения плотности монтажа.

Полуаддитивные методы позволяют повысить плотность монтажа, значительно уменьшить подтравливание проводников и сократить число операций технологического процесса. Стоимость таких плат на 20% ниже стоимости ДПП, изготовленных субтрактивными методами. Основной проблемой является повышение качества материалов и технологического оборудования.

## 12. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРОИЗВОДСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

### 12.1. Классификация интегральных микросхем по их конструкторско-технологическим особенностям

Интегральной микросхемой (ИМС) называется микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигнала и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов (или элементов и компонентов) и (или) кристаллов, которое с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации рассматривается как единое целое.

Часть ИМС, реализующая функцию какого-либо ЭРЭ, выполненная нераздельно от кристалла или подложки и которая не может быть выделена как самостоятельное изделие, называется элементом. Та часть ИМС, которая может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации, называется компонентом. В настоящее время развивается новое направление – функциональная микроэлектроника, некоторые устройства которой не могут быть разделены на ЭРЭ.

В ИМС используются электронные, магнитные, оптические и акустические явления в твердом теле /17/. Кроме того, микроэлектронная технология позволила создать вакуумные ИМС, элементами которых являются микроминиатюрные вакуумные диоды и триоды. Основными достоинствами ИМС являются весьма высокая надежность, малые массы габариты и энергопотребление.

По конструктивно-технологическому исполнению ИМС подразделяются на три большие группы: полупроводниковые, гибридные и прочие (рис. 53). В группу прочих входят пленочные, вакуумные, керамические и другие ИМС.

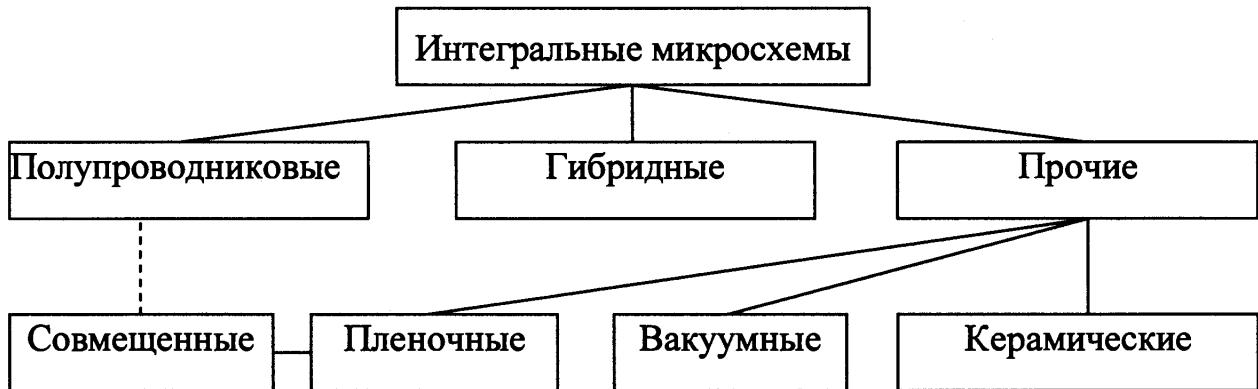


Рис. 53. Классификация ИМС по конструктивно-технологическим признакам

Полупроводниковой ИМС называется микросхема, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в объеме и на поверхности полупроводника. Если все элементы и межэлементные соединения ИМС выполнены в виде пленок, то она называется пленочной. Гибридная ИМС содержит, кроме пленочных элементов, также компоненты. В зависимости от толщины пленок и способа их получения пленочные и гибридные ИМС подразделяются на тонко- и толстопленочные.

Тонкопленочная ИМС – микросхема с толщиной пленок до 1 мкм, элементы которой изготавливаются преимущественно методами вакуумного распыления и осаждения.

Толстопленочная ИМС – микросхема с толщиной пленок 10-70 мкм, элементы которой изготавливаются методами трафаретной печати (сеткография).

Применяются также совмещенные ИМС. Их основу составляет полупроводниковый кристалл со сформированными в нем диодами и транзисторами, а пассивные элементы полностью и частично выполнены в виде напыленных на поверхность кристалла тонких пленок.

Степень интеграции ( $k$ ) представляет показатель сложности ИМС и характеризуется числом содержащихся в ней элементов и компонентов ( $N$ )

$$K = \lg N \quad (114)$$

В зависимости от количества элементов и компонентов конструктивно-технологического исполнения (металл – диэлектрик – полупроводник (МДП) или биполярные), а также функционального назначения (цифровые или аналоговые) различают ИМС малого, среднего, большого (БИС) и сверхбольшого (СБИС) уровня интеграции.

Плотностью упаковки называется отношение числа элементов и компонентов ИМС к ее объему. В ряде случаев для конкретного РЭС для улучшения показателей ее миниатюризации изготавливают микросборки (МСБ), в состав которых входят элементы, компоненты и ИМС (в корпусах или без них), а также другие ЭРЭ в различных сочетаниях.

Наибольшими степенью интеграции и плотностью упаковки обладают полупроводниковые ИМС, затем в порядке уменьшения этих показателей следуют тонкопленочные и толстопленочные (в том числе гибридные) ИМС и МСБ.

С точки зрения унификации процессов производства целесообразно применять в определенной аппаратуре ИМС единого конструктивно-технологического исполнения (полупроводниковые или гибридные). Совокупность типов ИМС, выполняющие различные функции, имеющих единое конструктивно-технологическое исполнение и предназначенных для совместного использования в РЭС, образуют серию ИМС.

Одним из современных направлений развития ИМС является производство и применение матричных БИС (СБИС) на основе матричных кристаллов, то есть кристаллов с большим количеством регулярно расположенных элементов, соединяемых между собой различным образом в зависимости от функционального назначения изготавляемой БИС (СБИС).

## 12.2. Конструкции и технология полупроводниковых микросхем

Основу полупроводниковой ИМС составляет полупроводниковый кристалл со сформированными в нем или на его поверхности и соединенными между собой в соответствии с электрической схемой элементами.

В настоящее время основным материалом для изготовления полупроводниковых микросхем является кремний. Кремний технологичен, обеспечивает путем его легирования широкий диапазон удельных сопротивлений, а пленка его окиси обладает важным свойством – препятствовать диффузии сквозь нее легирующих примесей при высоких температурах и играет таким образом роль защитной маски.

Другим материалом для полупроводниковых ИМС является арсенид галлия, обеспечивающий работу ИМС при высоких температурах и позволяющий изготавливать ИМС с высоким быстродействием.

В качестве невыпрямляющих омических контактов, а также для создания диодов Шотки применяются контакты металл – полупроводник. Образование выпрямляющего или невыпрямляющего контакта на границе металла с полупроводником зависит в основном от технологических факторов. Создание контактов к

локально легированным областям полупроводника обеспечивается напылением в вакууме тонкой металлической (алюминиевой) пленки на всю поверхность пластины, после чего с помощью фотолитографии создается рисунок соединений между элементами. Пластина полупроводника после формирования элементов и межсоединений разделяется на кристаллы прямоугольной формы, каждый из которых содержит одну микросхему. Процесс разделения называется скрайбированием, заключающимся в предварительном нанесении с помощью алмазного резца рисок и последующем разламыванием по ним пластины.

Если конструкция и, соответственно, структура диода или транзистора, достаточно ясны, так как из-за этих элементов и возникла полупроводниковая технология ИМС, то формирование резистивных и емкостных элементов существенно отличается как по методу их изготовления, так и по принципу их действия.

В качестве конденсаторов чаще всего находят применение обратно смещенные р-п-переходы. Кроме того, применяются структуры типа металл–диэлектрик–полупроводник (МДП). Реже используются структуры типа металл–диэлектрик–металл (МДМ). На рис.54 приведены различные конструкции конденсаторов на полупроводниковых структурах.

В качестве резисторов, то есть пассивных элементов ИМС, предназначенных для использования их электрического сопротивления, обычно используются слои полупроводника, создаваемые с помощью диффузии примесей одновременно с коллекторными или базовыми областями транзисторов, используются реже в качестве резисторов, так как они имеют малое удельное сопротивление. Кроме того, возможно применение резисторов, полученных путем вакуумного напыления на поверхность полупроводникового кристалла тонких пленок металлов или сплавов. Применяются также резисторы из поликристаллического кремния, нанесенного на поверхность кристалла.

Если ИМС должна содержать резисторы с достаточным высоким сопротивлением (порядка нескольких десятков кОм и более), то изготавливаются так называемые сжатые резисторы (пинч-резисторы). Например, в варианте пинч-резистора, использующего в качестве резистивного базовый слой, эмиттерный слой полностью перекрывает резистивную полоску и в полупроводниковой структуре непосредственно контактирует с коллекторным слоем. Соединенные таким образом, коллекторный и эмиттерный слои могут играть роль полевых затворов, если на них подавать обратное по отношению к резистивному слою смещение.

К недостаткам полупроводниковых резисторов следует отнести наличие паразитной распределительной емкости, сравнительно высокого ТКС и зависимость номинального сопротивления от величины приложенного к резистору напряжения, которое может модулировать площадь поперечного сечения резистивной полоски вследствие полевого эффекта. Кроме того, в резисторах, изолированных р-п-переходом, может проявляться паразитный транзисторный эффект. У резисторов, изготовленных нанесением на поверхность кристалла ИМС металлических или поликристаллических пленок, указанные выше недостатки отсутствуют.

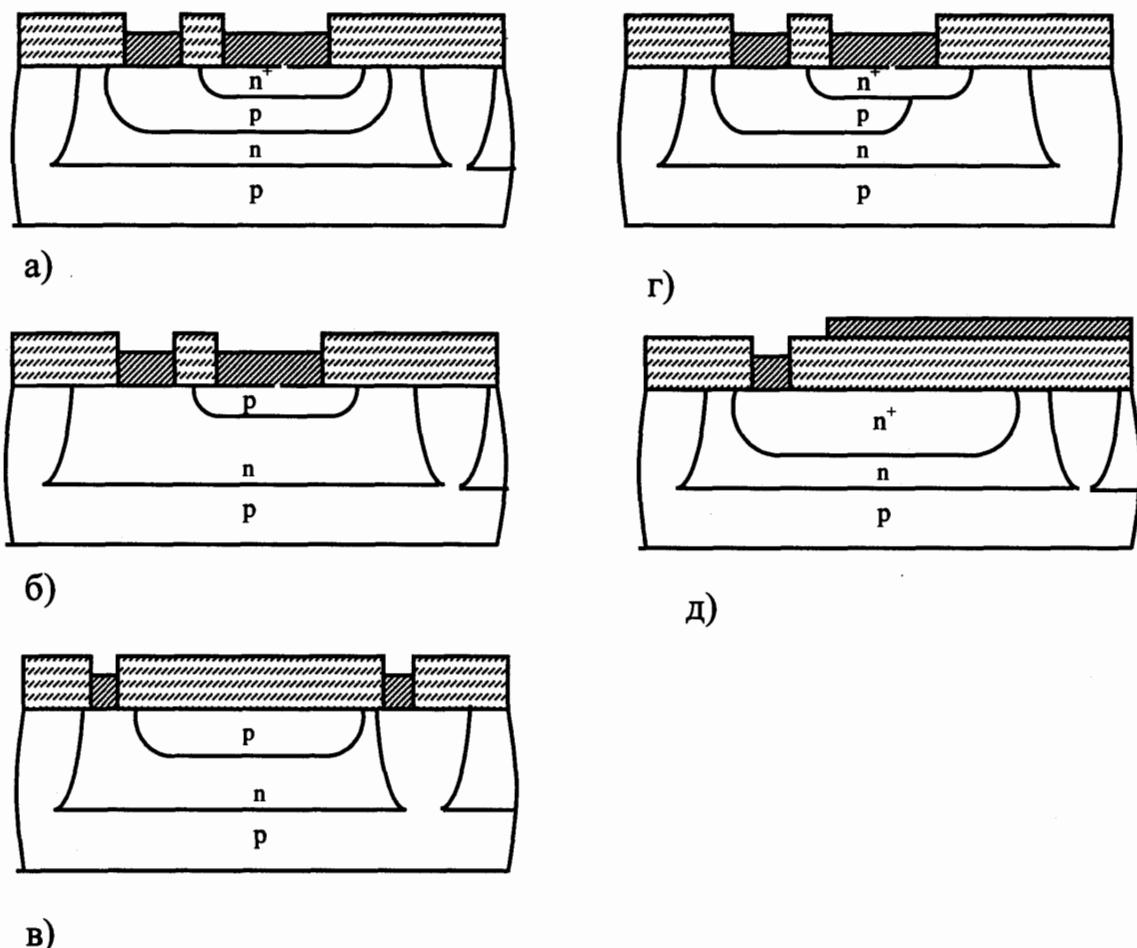


Рис. 54. Структуры конденсаторов полупроводниковых микросхем:  
а – на основе эмиттерного р-п-перехода транзистора; б – на основе коллекторного перехода; в – на основе р-п-перехода коллектор-подложка; г – на основе параллельно включенных емкостей эмиттерного и коллекторного р-п-переходов; д – типа металл-диэлектрик-полупроводник.

Для разработки топологии полупроводниковых ИМС /17/ первоначально производится оценка электрической схемы и номиналов ее элементов относительно принципиальной возможности изготовления ИМС. Рассчитываются параметры и геометрические размеры (топология) элементов. Путем преобразования электрической принципиальной схемы составляется схема расположения элементов и соединений. По возможности упрощаются линии межсоединений, сокращается их длина, количество их изломов и пересечений, составляется эскиз топологии в масштабе 100:1 и более.

Последовательность изготовления планарного р-п-перехода в эпитаксиальном слое на кремниевой подложке ИМС показана на рис.55. Первоначально на кремниевую подложку толщиной около 300 мкм осаждается эпитаксиальный слой кремния (рис.55,а), при этом подложка и слой образуют единый монокристалл. Процесс осаждения производится при температуре 1270<sup>0</sup>С в специальном кварцевом реакторе (печи), в который помещают механически и химически полированные подложки. В реактор подается парогазовая смесь четыреххлористого кремния с водородом. В результате реакции на подложку осаждается эпитаксиальный слой, а остальные продукты реакции удаляются.

Нужный тип проводимости эпитаксиального слоя обеспечивается путем подачи в реактор паров химических соединений, содержащих легирующие элементы доноров или акцепторов, например фосфина ( $PH_3$ ) или диборана ( $B_2H_6$ ).

В целях создания окисной пленки на поверхности кремниевой эпитаксиальной структуры (рис.55,б) проводится процесс термического окисления. Поток окислителя (сухой кислород, пары воды или их смесь) подается в кварцевую трубу при температуре 1000-1200 $^{\circ}$ С. Пленка  $SiO_2$  на поверхности кремния используется в качестве маски при проведении диффузионных процессов или внедрении примеси путем ионной имплантации, что наиболее эффективно для атомов фосфора и бора. Атомы  $Al$ ,  $Ga$ ,  $O$ ,  $Zn$  и другие проникают через пленку  $SiO_2$ .

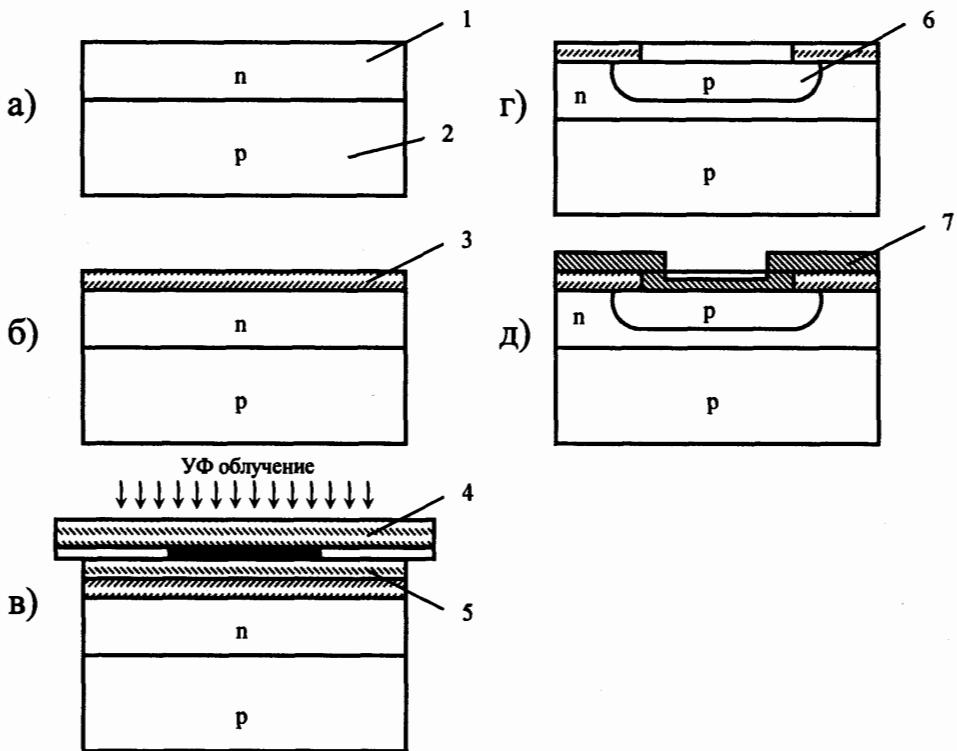


Рис.55. Основные этапы изготовления планарного p-n-перехода в эпитаксиальной структуре полупроводниковой ИМС:

а – исходная структура; б – структура с окисной пленкой на поверхности; в – экспонирование фотополимера через фотошаблон; г – образование p-n-перехода в результате диффузии акцепторной примеси через окно в окисле; д – создание дорожек межсоединений (металлизации); 1 – эпитаксиальный слой; 2 – подложка; 3 – пленка двуокиси кремния; 4 – фотошаблон; 5 – фотополимер; 6 – диффузионная область; 7 – металлизация.

Для создания в кремнии локально легированных областей с помощью процесса фотолитографии в окисной маске образуются окна (рис.55,в) и через вскрытые с помощью фотолитографии окна в окисной пленке в кремниевую структуру вводятся примеси (рис.55,г).

Основными методами введения примесей в процессе изготовления ИМС являются диффузия и ионная имплантация.

Технология диффузионных процессов заключается в термической обработке кремниевых пластин в газовой атмосфере в кварцевой трубе при температуре 900-1200 $^{\circ}$ С. Наиболее широко используются жидкие диффузанты, например со-

единения  $BBr_2$ ,  $POCl_2$ . В пространстве кварцевой трубы протекают химические реакции в результате которых атомы бора или фосфора проникают вглубь кремниевой пластины и одновременно на ее поверхности образуется тонкая пленка двуокиси кремния.

После проведения в течение 30–60 минут подобного диффузионного процесса в кремнии образуется тонкий, приповерхностный легированный примесью слой. Если затем с поверхности пластины удалить насыщенную примесью окисную пленку и вновь подвергнуть кремний воздействию высокой температуры без подачи диффузанта извне, то атомы примеси из указанного тонкого слоя будут диффундировать далее вглубь кремния.

Технология введения примесей путем ионной имплантации заключается во внедрении заряженных атомов примесей в кремний с помощью ионно-лучевых ускорителей, где ионам сообщается энергия от нескольких десятков до сотен килоэлектронвольт. Генерация ионов осуществляется в плазме дугового разряда. В качестве рабочих веществ применяются химические соединения  $BBr_2$ ,  $PCl_3$  и другие. Пары этих соединений подаются в газоразрядную камеру, откуда из плазмы разряда с помощью ионно-оптической системы вытягиваются ионы. На пути к мишени-подложке ионы проходят магнитный анализатор, в который в зависимости от массы и заряда ионы разделяются на пучки. К полупроводниковой подложке направляется только нужный изотопный пучок, что позволяет понизить требования к частоте исходных рабочих веществ.

Соединение внешних контактных площадок микросхемы на кристалле с контактными площадками выводов корпуса обеспечивается с помощью термокомпрессии. Этот процесс представляет собой вид сварки давлением при относительно небольшой температуре (около  $300^{\circ}\text{C}$ ). Золотая или алюминиевая проволока диаметром 10–50 мкм с помощью специально заточенной иглы, закрепленной в термокомпрессионной головке с подогревом, прижимается к контактным площадкам, причем обеспечивается давление примерно  $10^8$  Па. Взаимное проникновение материалов обеспечивает прочное соединение.

При изготовлении бескорпусных полупроводниковых микросхем сначала к кристаллам с помощью термокомпрессии присоединяются проволочные выводы, после чего кристалл герметизируется компаундом. Жесткие выводы бескорпусной микросхемы изготавливаются путем гальванического наращивания на внешние контактные площадки кристалла металлических многослойных структур в виде полусфер (шариковые выводы) или прямоугольных полосок (балочные выводы).

### 12.3. Технологический процесс производства тонкопленочных гибридных интегральных микросхем

Пассивные элементы, в том числе межсоединения ГИС и МСБ, создаются вакуумным напылением тонких пленок металлов, сплавов, композиционных материалов и диэлектриков на диэлектрические подложки из керамики, ситалла или стекла. Необходимая конфигурация элементов и межсоединений обеспечивается или путем напыления пленок на подложки через маски, или с помощью фотолитографических процессов.

Основные этапы технологического процесса получения ГИС и МСБ при напылении пленок через маски показаны на рис.56.

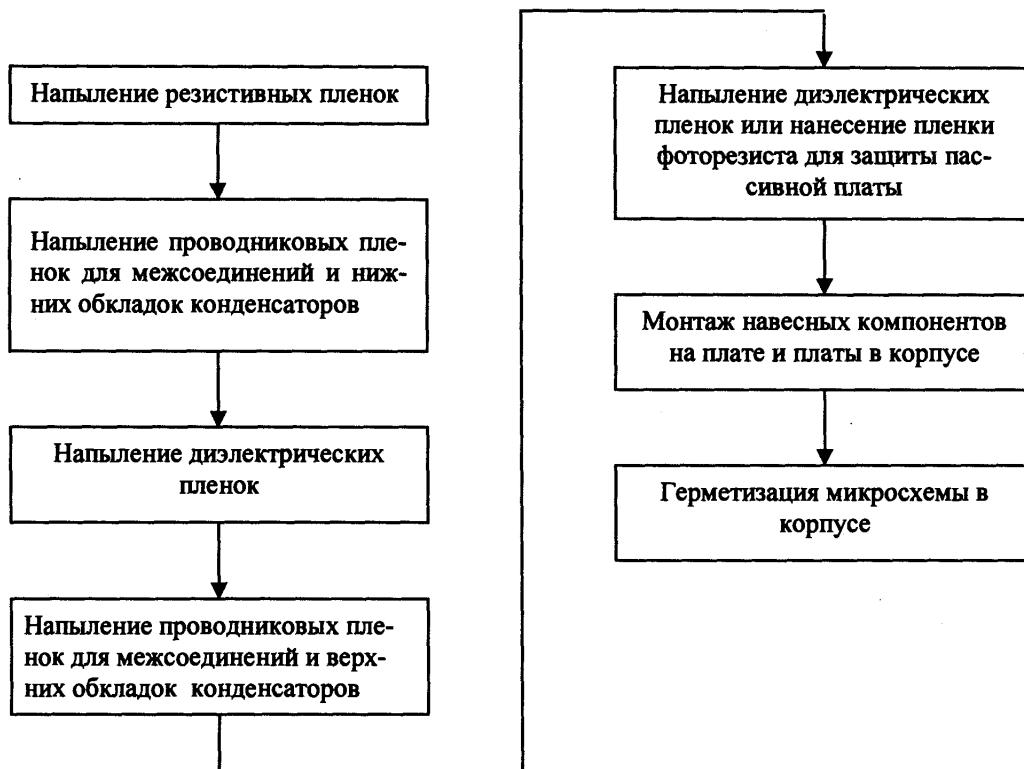


Рис.56. Основные этапы изготовления тонкопленочных гибридных ИМС с помощью масок

Биметаллическая маска представляет собой двухслойную структуру из бериллиевой бронзовой фольги толщиной 0,1–0,15 мм, на которую гальваническим путем нанесена тонкая (примерно 10 мкм) пленка никеля (рис.57). Бронзовая фольга играет роль несущей подложки, а пленка никеля обеспечивает необходимые размеры окон с минимально возможной погрешностью.

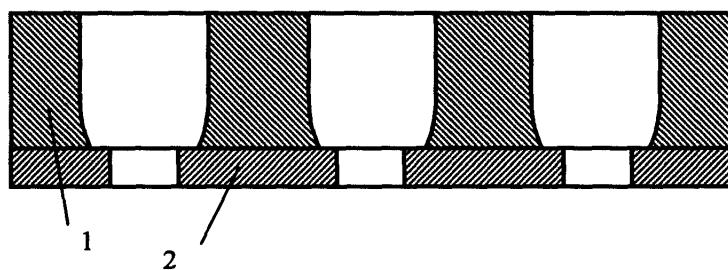


Рис.57. Биметаллическая маска, используемая при напылении на подложку тонких пленок (разрез): 1 – бронзовая фольга; 2 – пленка никеля.

Подобная конструкция масок обусловлена технологическими особенностями их получения. Маску изготавливают с помощью процессов фотолитографии. Отверстия в ней протравливаются через окна в фоторезисте, который наносится на ее поверхность, затем засвечивается через фотошаблон с соответствующим рисунком, проявляется и подвергается температурной обработке (задубливается).

Вытравливание через окно в фоторезисте отверстия в сравнительно толстой бронзовой фольге связано с одновременным сильным боковым растрепливанием материала. Этот процесс не поддается контролю и не позволяет обеспечить точные размеры отверстий. В то же время вытравливание отверстий, соответствующих заданному технологическому рисунку какого-либо слоя микросхемы, в тонкой пленке никеля может быть осуществлено с высокой точностью. Заметим, однако, что при изготовлении микросхем напыление материалов происходит не только в отверстия в маске, но и на поверхность самой маски. В результате размеры отверстий со временем перестают отвечать заданным, маску приходится заменять.

Как видно из рис.5б, после напыления резистивных, проводящих и диэлектрических пленок полученная пассивная плата (без навесных компонентов) покрывается защитной пленкой диэлектрика, роль которого может играть фоторезист или полимидный лак. Применение фоторезиста позволяет с помощью фотолитографических процессов получить защитную пленку с любым топологическим рисунком. В частности, в нужных местах могут быть оставлены открытые участки платы, например, для приклеивания навесных компонентов и для присоединения их выводов к контактным площадкам. Применение полимидного лака, который наносят на поверхность платы пульверизацией через маску (трафарет), не позволяет оставлять открытые участки, окруженные со всех сторон защитной пленкой. Кроме того, плата может покрываться для защиты пленками неорганических диэлектриков, напыляемых через маски в вакууме, например пленкой SiO и другими. В этом случае использование масок также не позволяет оставлять открытые участки в центре платы, окруженные со всех сторон защитной пленкой.

Разрезание подложек, изготовленных из ситалла или стекла, на платы с отдельными микросхемами осуществляется путем скрайбирования, то есть так же, как и в случае разделения полупроводниковых пластин на кристаллы. Применение скрайбирования возможно и при разделении керамических подложек, однако точность обеспечения размеров при этом невелика. Поэтому керамические платы значительной толщины часто сразу изготавливают нужных размеров.

Монтаж навесных компонентов заключается в их закреплении на платах ГИС и МСБ с помощью различных клеев, смол, компаундов и последующем создании соединений их выводов с контактными площадками платы путем термокомпрессии, пайки или сварки.

Для закрепления компонентов на платах используются клеи марок ТКЛ-1, ВК-9 и другие. Процесс пайки припоями хорошо известен, процесс термокомпрессии осуществляется так же, как и при монтаже полупроводниковых ИМС. Создание электрических соединений и прочное закрепление гибких выводов компонентов на пленочных контактных площадках платы часто осуществляется путем электрической контактной сварки. Для этого используется расщепленный электрод. Он представляет собой миниатюрные рядом расположенные электрически изолированные друг от друга половинки электрода, закрепленные в сварочной головке. Обе части расщепленного электрода одновременно прижимают гибкий вывод к контактной площадке. Через расщепленный электрод пропускают ток, который проходит последовательно через одну половину электрода, затем через участок прижатого к плате гибкого вывода и через вторую половину элек-

трова. При этом часть гибкого вывода, через которую протекает ток, нагревается до значительной температуры и создается сварное контактное соединение.

Если необходимо осуществить соединение без значительного нагрева, применяют контактную сварку с наложением на рабочую головку ультразвуковых колебаний, интенсифицирующих процесс сварки.

Компоненты (бескорпусные транзисторы и микросхемы) с шариковыми (столбиковыми) выводами монтируются методом "перевернутого кристалла". Покрытые припоеем шарики соединяются с контактными площадками платы при подогреве сварочным инструментом кристалла навесного компонента и наложении ультразвуковых колебаний. Установка компонентов с шариковыми выводами, диаметр которых составляет примерно 50 мкм, на контактные площадки платы связана со значительными трудностями их взаимного совмещения.

Навесные компоненты с балочными выводами более удобны. Они представляют собой расположенные на поверхности кристалла бескорпусного транзистора или полупроводниковой микросхемы металлические миниатюрные балки толщиной примерно 20 мкм и шириной 200 мкм. Через контактные окна в двуокиси кремния балки контактируют с полупроводниковыми областями навесного бескорпусного транзистора или микросхемы и, проходя поверх двуокиси кремния, образуют выступы длиной примерно 500 мкм за пределами кристалла, "нависая" над его краями. Подобные выводы создаются из полосок фольги, приваренных к контактным площадкам кристалла, или гальваническим осаждением металлов. Компоненты с балочными выводами монтируются на платы ГИС и МСБ также методом перевернутого кристалла, то есть контактными площадками и балочными выводами вниз, к плате, и закрепляются kleem. Выводы привариваются к контактным площадкам платы с наложением ультразвуковых колебаний. Поскольку балочные выводы выступают за пределы кристалла, их совмещение с контактными площадками платы осуществляется более легко, чем у компонентов с шариковыми выводами.

Способ монтажа плат тонкопленочных ГИС и МСБ в корпусе зависит от типа применяемого корпуса. При монтаже в металлокерамическом или металлополимерном корпусе плата приклеивается к основанию корпуса kleями, смолами, компаундами, например kleями марок МПФ-1, КВК, ВК-9. Соединение внешних контактных площадок платы с выводами корпуса осуществляется, как правило, теми же методами, какими создаются соединения выводов навесных компонентов с контактными площадками платы. Например, если при монтаже навесных компонентов применялась термокомпрессия, от нее при монтаже платы в корпусе для унификации технологического процесса должна использоваться также термокомпрессия.

Герметизация корпусов осуществляется сваркой (например, аргоннодуговой), пайкой припоями. Иногда крышку корпуса приклеивают к основанию эпоксидными смолами.

Поверхностная конфигурация элементов ГИС и МСБ может создаваться с помощью фотолитографических процессов (рис.58). В этом случае на плату первоначально напыляется сплошная пленка резистивного материала, а поверх нее сплошная пленка проводникового материала. Затем наносится фоторезист, кото-

рый экспонируется через фотошаблон, проявляется и задубливается. Через окна в фоторезисте травителем удаляются участки одновременно проводниковой и резистивной пленки там, где в соответствии с топологическим чертежом поверхность платы остается свободной. Далее проводится вторая фотолитография, в результате которой селективным травителем с поверхности резистивной пленки удаляется проводниковая пленка в тех местах, где должны быть резисторы. Заметим, что при получении элементов данным методом под всеми токопроводящими дорожками платы остаются дорожки из резистивной пленки, что, однако, не ухудшает свойств межсоединений. Более того, резистивные пленки, как правило, играют роль подслоя для улучшения адгезии токопроводящих пленок к плате.

Если изготавливаемые с помощью фотолитографии ГИС и МСБ должны содержать в своем составе конденсаторы, то они обычно монтируются в виде навесных компонентов. При необходимости могут быть получены и пленочные конденсаторы, однако применение фотолитографических процессов при этом исключается. Это объясняется отсутствием надежных селективных травителей, которые воздействовали бы только на диэлектрические пленки, не повреждая нижележащие проводниковые. Поэтому диэлектрики пленочных конденсаторов и проводниковые пленки верхних обкладок напыляются через маски (см. рис.58). Остальные технологические процессы проводятся уже описанными методами.

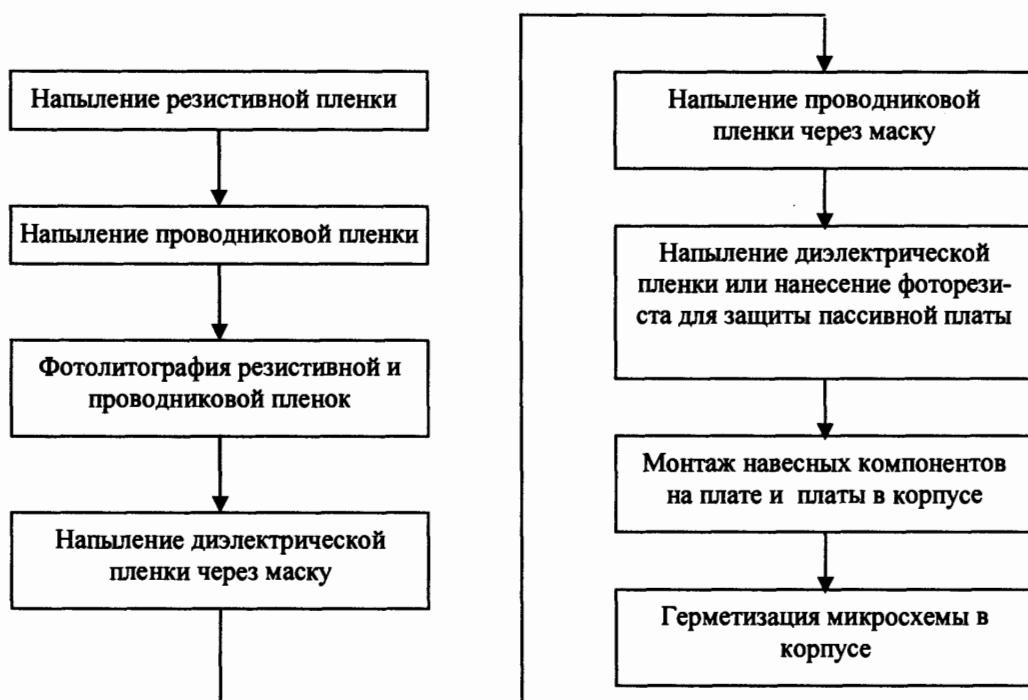


Рис.58. Основные этапы изготовления тонкопленочных гибридных ИМС с помощью фотолитографии.

#### 12.4. Технологический процесс производства толстопленочных микросхем

Нанесение паст на подложки в технологическом процессе сеткографии осуществляется, как правило, с помощью полуавтоматических установок. Основными узлами подобной установки являются: вакуумный или механический держ-

жатель подложек с механизмом для их подачи и удаления, рамка с трафаретом и ракель с механизмом для его перемещения. Установки содержат также приспособления для юстировки трафаретов в плоскости подложки, для юстировки расстояния между трафаретом и подложкой, а также для регулирования силы давления ракеля.

Существуют две разновидности трафаретов – нитяные и фольговые. В соответствии с двумя типами трафаретов различают два вида трафаретной печати – бесконтактную и контактную. В первом случае трафарет касается подложки только лишь под ракелем, и другом – по всей поверхности подложки.

Трафарет для бесконтактной печати изготавливается в виде натянутой на алюминиевую рамку сетки из стальных проволочек или капроновых нитей. Сетка покрывается фоторезистом или специальной светочувствительной бумагой. Рисунок соответствующего слоя микросхемы фотографически наносится (экспонируется) на фоторезист или бумагу, причем в процессе проявления в них вскрываются окна, обнажающие сетку в тех местах, где через нее должна продавливаться паста (рис.59,а).

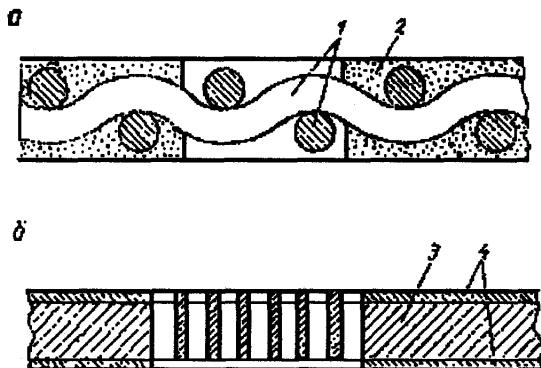


Рис.59. Сетчатые трафареты для нанесения паст при изготовлении толстопленочных гибридных ИМС:

а – проволочный (нитяный); б – фольговый; 1 – проволоки (нити);  
2 – фоторезист; 3 – бронзовая фольга; 4 – пленки никеля.

Сетки характеризуются количеством проволочек или нитей на единицу длины. Единицей разрешающей способности сетки являются меш, соответствующий количеству проволочек на один дюйм. Например, сетка 200 меш имеет 8 проволочек на 1 мм. При диаметре проволоке 25 мкм размер ячейки сетки в свету составляет примерно 100 мкм. Обычно для толстопленочной печати применяются сетки от 105 до 325 меш, то есть от 4 до 12 проволочек на 1 мм. Более грубые сетки используются для получения более толстых пленок. Между сетчатым трафаретом и подложкой оставляется расстояние от 0.25 до 1.5 мм в зависимости от размеров ячеек сетки. Ракели изготавливаются из резины или полиуретана. Давление ракеля на трафарет устанавливается примерно 100 Н на 1 мм его длины, скорость движения по трафарету составляет 50–200 мм/с.

Фольговый трафарет для контактной печати представляет собой триметаллическую структуру из бронзовой фольги, покрытой с обеих сторон тонкими слоями никеля. В бронзе путем травления создается сетка-растр, имеющая то же назначение, что и сетка трафарета для бесконтактной печати, то есть выравнивание слоя пасты при нанесении на подложку. В слоях никеля вытравливаются окна, соответствующие рисунку нужного слоя микросхемы (рис.59,б). Контактная печать обеспечивает повышенную точность получения рисунка слоя.

После нанесения слоя пасты на подложку последняя в течение нескольких минут выдерживается при комнатной температуре. При этом отдельные островки пасты, образовавшиеся после проплавления ее через ячейки сетки трафарета, растекаются и создают ровную поверхность слоя. Затем слой пасты подвергается сушке в течение 15–20 минут при температуре 80–125 °С. Во время сушки из пасты медленно удаляются органические растворители. В случае ускорения этого процесса при последующем вжигании пленке могут появиться трещины и пузыри. Для сушки применяются инфракрасные лампы.

В процессе вжигания нелетучая составляющая органического связующего выгорает, стеклянная фритта размягчается, растекается по керамической подложке (или межслойному диэлектрику) и создает прочную связь между частицами металлов и окислов.

Высокотемпературная обработка паст производится в многозонных конвейерных печах в воздушной атмосфере. Скорость воздушного потока в печи 5–12 см/с. Скорость конвейерной ленты от 12 до 150 мм/мин. Скорость нарастания температуры до максимальной устанавливается на уровне 30–70 °С с точностью  $\pm 2$  °С/мин. Максимальная температура в печи поддерживается с точностью  $\pm 10$  °С для проводниковых и  $\pm 1$  °С для резистивных паст.

Пример температурно-временного режима вжигания проводниковой пасты приведен на рис.60.

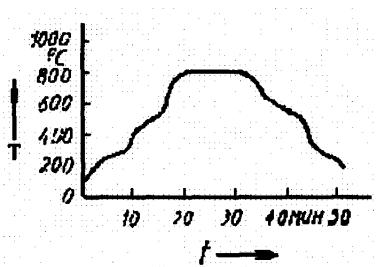


Рис.60. Температурно-временной режим вжигания толстых пленок.

Процессы сушки и вжигания паст играют решающую роль в обеспечении основных параметров элементов толстопленочных микросхем: проводимости и способности к лужению проводников; удельной емкости диэлектриков; удельного сопротивления, ТКС и шумов резисторов; временной стабильности всех элементов.

Особое значение имеет порядок нанесения и вжигания пленок. Первоначально печатаются и вжигаются проводники, поскольку проводниковые пасты

могут выдерживать многократные последующие термообработки. Затем наносятся диэлектрические пленки для конденсаторов и пересечений проводников.

Если толщина сырой диэлектрической пленки составляет, например, 35 мкм, то после сушки – 25 мкм, а после вжигания – 20 мкм.

Для повышения надежности конденсаторов и пересечений проводников диэлектрические пасты накладываются дважды.

Резистивные пасты наносятся и вжигаются в последнюю очередь. После них могут наноситься только защитные диэлектрические пленки, которые вжигаются одновременно с резистивными или после них при пониженной до 500 °С температуре.

Если толщина сырой резистивной пленки составляет, например, 50 мкм, то после сушки – 25 мкм, а после вжигания – 17 мкм.

Изменение порядка нанесения и вжигания паст приводит к остекловыванию резистивных пленок при многократных термообработках, к резкому неконтролируемому возрастанию их удельного сопротивления и к увеличению сопротивления контактов с проводниковыми элементами.

В состав проводниковых и резистивных паст входят редкие и благородные металлы, что заставляет учитывать расход этих материалов. Чем меньше площадь пленочных проводников и резисторов, тем экономичнее производство микросхемы. Разумеется, размеры подложки и расход диэлектрических паст также влияют на стоимость.

Сборка микросхем начинается с армирования выводами плат с нанесенными на них пленочными элементами и покрытыми в нужных местах защитным диэлектрическим слоем. Затем платы подвергаются лужению, после чего производится подгонка резисторов. Активные и другие навесные компоненты закрепляются на платах с помощью клеев холодного отвердения на основе эпоксидных смол, например марки ЭД-6 и другие.

Присоединение выводов навесных компонентов к контактным площадкам микросхем может осуществляться обычной пайкой различного рода припоями. Проводники и контактные площадки, изготовленные из паст, состоящих в основном из золота и серебра, склонны к растворению в обычных свинцово-оловянных припоях. Поэтому присоединение выводов к ним создается термокомпрессией или ультразвуковой сваркой. Иногда в этих случаях используют пайку эвтектическими сплавами золота с германием или кремнием, а также сплавом серебро-медь.

Герметизация микросхем осуществляется путем установки плат под колпачок корпуса и последующей заливки с наружной стороны герметизирующим компаундом, который изготавливается на основе эпоксидных смол. После герметизации микросхемы маркируются и покрываются прозрачным лаком. Если элементы и компоненты расположены только с одной стороны платы, то микросхемы могут устанавливаться в стандартные металлокерамические или металлокомпозитные корпуса.

Схема процесса производства толстопленочных микросхем представлена на рис.61.

Масштабы производства толстопленочных микросхем неуклонно расширяются. Основные усилия разработчиков направлены на получение паст, обеспечи-

вающих повышенную разрешающую способность рисунка, улучшенные температурную и временную стабильности элементов, на изготовление паст, в которых благородные металлы заменены на более доступные — никель, медь, алюминий, вольфрам. Помимо снижения затрат на материалы, данные пасты способны обеспечивать улучшение ряда параметров элементов. Так, например, достигается улучшение температурной стабильности. Поскольку при вжигании таких паст не образуются окислы металлов, проявляющие полупроводниковые свойства, резисторы на основе неблагородных металлов обладают меньшими собственными шумами, большей линейностью воль-амперных характеристик, повышенной электрической прочностью.

Снижение затрат на материалы, однако, сопровождается увеличением сложности и стоимости технологического процесса. Пасты на основе неблагородных металлов требуют высокотемпературных режимов термообработки в контролируемых газовых средах. Большинство из них не обеспечивает возможности обычной пайки, поэтому проводники необходимо делать двухслойными. Возникают трудности совмещения проводящих и резистивных паст.

Разрабатываются также пасты, обеспечивающие возможность применения фотолитографического процесса. Они позволяют повысить разрешающую способность рисунка микросхемы и таким образом увеличить степень интеграции. Ширина проводниковых дорожек может быть снижена до 50 мкм. Диэлектрические пасты для многослойной изоляции схем с высокой степенью интеграции позволяют создавать окна с поперечным размером 125 мкм в пленках толщиной 25 мкм, а в пленках толщиной 15 мкм размеры окон могут быть уменьшены до 75 мкм. Пасты содержат компонент, чувствительный к ультрафиолетовому облучению. Облученные участки паст не удаляются растворителем в процессе проявления рисунка (негативный фотопроцесс). Пасты наносятся сплошным слоем на керамическую подложку через трафарет при освещении желтым светом, затем в течение 30 минут подсушиваются в потоке воздуха, нагреветого до  $60^{\circ}\text{C}$ . Сравнительно низкая температура сушки объясняется необходимостью сохранения в пасте фоточувствительного компонента от испарения.

Экспонирование ведется через стеклянный или пленочный фотошаблон, совмещение производится под микроскопом. Для получения ультрафиолетового излучения используются ртутные лампы. Поскольку фоточувствительный компонент пасты изменяет свои свойства при контакте с кислородом воздуха, экспонирование проводится в вакууме примерно 150-300 Па или в атмосфере азота. Время экспонирования составляет 15-60 с. Если используется лампа мощностью 250 Вт, оно зависит также от толщины облучаемой пленки.

Растворителем при проявлении служит перхлорэтилен. Удаление необлученных участков пасты осуществляется путем пульверизации перхлорэтилена в течение 30 с. После сушки на воздухе дальнейшие манипуляции с платами могут проводиться при освещении белым светом. Термообработка паст ведется в воздушной атмосфере в течение 35 минут с выдержкой 4 минуты при  $850\text{-}900^{\circ}\text{C}$ .

В настоящее время изготовление толстопленочных микросхем является рентабельным как при мелкосерийном, так и при массовом типе производства. Низкая стоимость, короткие сроки от начала конструирования до выпуска готов-

вых изделий, разнообразие областей применения, высокая надежность и другие положительные качества обеспечивают толстопленочным микросхемам большое будущее.



Рис.61. Основные этапы изготовления толстопленочных гибридных ИМС.

## 13. ПАТЕНТНО-ПРАВОВЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКОЕ ТВОРЧЕСТВО

### **13.1.Основные положения патентного законодательства**

Настоящие положения изложены на основе Патентного закона Российской Федерации регулирующим имущественные и неимущественные отношения, возникающие в связи с созданием, правовой охраной и использованием изобретений, полезных моделей и промышленных образцов (далее по тексту объекты промышленной собственности). В соответствии с этим Законом заявки на объекты промышленной собственности, их экспертизу, выдачу патентов производит Государственное патентное ведомство, а права на объект промышленной собственности подтверждает патент, удостоверяющий приоритет, авторство и исключительное право на их использование. Срок действия патента до 20 лет и может быть продлен Патентным ведомством.

Изобретению предоставляется правовая охрана, если оно является новым (неизвестным из уровня техники), имеет изобретательский уровень (т.е. оно для специалиста явным образом не следует из уровня техники) и промышленно применимо. Объектами изобретения могут являться: устройство, способ, вещество, а также их применение по новому назначению. Не признаются патентоспособными изобретениями: научные теории и математические методы; условные обозначения; алгоритмы и программы для ЭВМ; решения, касающиеся только внешнего вида; топологии ИМС и др.

Полезными моделями являются конструктивные выполнения средств производства и предметов потребления, а также их составных частей и им предоставляется правовая охрана если они являются новыми и промышленно применимыми. В качестве полезных не охраняются способы, вещества, их применения по новому назначению, а также объекты, не признающиеся патентоспособными изобретениями.

К промышленному образцу относится художественно-конструкторское решение изделия, определяющее его внешний вид, и ему предоставляется правовая охрана, если он является новым, оригинальным и промышленно приемлемым. Промышленный образец признается новым, если совокупность его существенных признаков, определяющие его эстетические и (или) эргономические особенности изделия, не известна в мире до его даты приоритета. Патентоспособным промышленным образцом не являются решения, обусловленные исключительно технической функцией изделия; объектов неустойчивой формы из жидких, газообразных, сыпучих или им подобных веществ; изделий, противоречащих принципам гуманности и морали.

Автором (авторами) объекта промышленной собственности признается физическое лицо (лица), чьим творческим трудом он создан. Автору (авторам) объекта промышленной собственности выдается патент. Право на получение патента на объект промышленной собственности, созданного работником в связи с выполнением им своих служебных обязанностей принадлежит работодателю, если договором между ними не предусмотрено иное. Если работодатель в течение четырех месяцев с момента уведомления его автором о созданном объекте промыш-

ленной собственности, не подаст заявку в Патентное ведомство, не переуступит право на подачу заявки другому лицу, то его автор имеет право подать заявку и получить патент на своё имя.

Патентообладателю принадлежит исключительное право на использование охраняемого патентом объекта промышленной собственности, включая право запретить использование указанных объектов другими лицами. Патентообладатель может уступить полученный патент любому физическому или юридическому лицу. Договор об уступке патента подлежит обязательной регистрации в Патентном ведомстве. Патент и право на его получение переходит по наследству.

Лицо, не являющееся патентообладателем, вправе использовать объект промышленной собственности, защищенный патентом, лишь с разрешения патентообладателя (на основе лицензионного договора). Лицензионный договор подлежит обязательной регистрации в Патентном ведомстве. Не признается нарушением права патентообладателя проведение научного исследования или эксперимента над объектом промышленной собственности при чрезвычайных обстоятельствах (стихийных бедствиях, катастрофах) с последующей выплатой Патентообладателю соразмерной компенсации; применение средств, содержащих объект промышленной собственности в личных целях без получения дохода.

Получение патента. Заявка на выдачу патента на объект промышленной собственности должна относится к одному объекту или группе объектов, связанных между собой настолько, что они образуют единый изобретательский замысел. К заявке прилагаются документ, подтверждающий уплату пошлины в установленном размере или основания для освобождения от уплаты пошлины. Требования к документам, содержащимся в заявке на объект промышленной собственности устанавливаются Патентным ведомством.

Заявка на выдачу патента изобретения должна содержать:

заявление о выдаче патента с указанием автора (или авторов) на имя которого испрашивается патент, а также его местожительство или местонахождение;

описание изобретения, раскрывающее его с полнотой достаточной для осуществления;

формулу изобретения, выражющую его сущность и полностью основанную на описании;

чертежи и иные материалы, если они необходимы для понимания сущности изобретения;

реферат.

Заявка на выдачу свидетельства на полезную модель должна содержать:

заявление о выдаче свидетельства с указанием авторов, их местожительства или местонахождения;

описание полезной модели, раскрывающее ее полнотой, достаточной для осуществления;

формулу полезной модели, выражющую ее сущность и полностью основанную на описании;

чертежи;

реферат.

Заявка на выдачу патента на промышленный образец должна содержать:

заявление о выдаче патента с указанием авторов, их местожительства или местонахождения;

комплект фотографий отражающих изделие, макет или рисунок, дающих полное детальное представление о внешнем виде изделия;

чертеж общего вида изделия, эргономическую схему, конфекционную карту, если они необходимы для раскрытия сущности промышленного образца;

описание промышленного образца, включающее перечень его существенных признаков.

Приоритет объекта промышленной собственности устанавливается по дате поступления в Патентное ведомство заявки содержащей указанные выше документы. В течение двух месяцев с даты поступления заявки заявитель имеет право внести в нее материалы исправления и уточнения без изменения сущности заявленного изобретения, полезной модели или промышленного образца.

По истечении двух месяцев с даты поступления заявки Патентное ведомство проводит по ней формальную экспертизу. По истечении восемнадцати месяцев с даты поступления заявки, прошедшей формальную экспертизу с положительным результатом, Патентное ведомство публикует сведения о заявке. Состав публикуемых сведений определяет Патентное ведомство. После опубликования сведений о заявке любое лицо вправе ознакомится с ее материалами. Заявленному изобретению с даты публикаций сведений о заявке до даты публикаций сведений о выдаче патента предоставляется временная правовая охрана. Лицо, использующее заявленное изобретение в этот период, выплачивает патентообладателю после получения патента денежную компенсацию определяющуюся соглашением сторон.

При экспертизе заявки на выдачу свидетельства на полезную модель проверка соответствия вышеуказанным условиям патентоспособности не осуществляется. Свидетельство выдается под ответственность заявителя без гарантий действенности.

По заявке на выдачу патента на промышленный образец Патентное ведомство проводит формальную экспертизу и экспертизу по существу. При положительном результате этих экспертиз Патентное ведомство, при условии уплаты заявителем пошлины за выдачу патента, публикует в своем бюллетене сведений о выдаче патента, включающем имена (имя) автора и патентообладателя, название и формулу изобретения или полезной модели или перечень существенных признаков промышленного образца и его изображения. Одновременное Патентное ведомство вносит в Государственный реестр, соответствующий объект промышленной собственности и выдает патент (один, даже если патент испрашивался на имя нескольких лиц).

Споры, связанные с применением положений Патентного закона об оспаривании патента рассматриваются последовательно в Апелляционной палате, в Высшей патентной палате или в судебном порядке, где рассматриваются споры об авторстве, об установлении патентообладателя о заключении и исполнении лицензионных договоров, о выплате вознаграждения автору работодателем и др.

Патентование в зарубежных странах изобретений, полезных моделей, промышленных образцов, созданных в Российской Федерации, осуществляется не ранее чем через три месяца после подачи заявки в Патентное ведомство.

### 13.2. Патентно-правовые показатели конструкции РЭС

Патентно-правовые показатели позволяют оценить конкурентоспособность конструкции РЭС и ее новизну. Они определяются в окончательном виде при завершении разработки, но данные для их определения подготавливаются с самого начала разработки при постепенном заполнении патентного формулера (ГОСТ 2.110–68). Патентно-правовой уровень конструкции оценивается двумя безразмерными показателями: показателем патентной защиты и показателем патентной чистоты.

Показатель патентной защиты характеризует число и весомость новых отечественных изобретений, реализованных в данном изделии, в том числе и созданных при его разработке, т.е. оценивает степень защиты изделия авторскими свидетельствами и патентами в России и за рубежом, принадлежащими российским предприятиям, с учетом значимости каждого технического решения.

Показатель патентной защиты вычисляется по формуле

$$\Pi_{\text{п.з}} = \Pi'_{\text{п.з}} + \Pi''_{\text{п.з}},$$

где  $\Pi_{\text{п.з}}$  – показатель патентной защиты патентами России,  $\Pi'_{\text{п.з}}$  – показатель патентной защиты патентами за рубежом;

$$\Pi'_{\text{п.з}} = \frac{\sum_{i=1}^s K_i N'_i}{N},$$

где  $K_i$  – коэффициент весомости составных частей (по группам значимости);  $N_i$  – число составных частей, защищенных авторскими свидетельствами (по группам значимости) и патентами России;  $N$  – общее число составных частей в изделии;  $s$  – число групп значимости;

$$\Pi''_{\text{п.з}} = \frac{m \sum_{i=1}^s K_i N''_i}{N},$$

где  $m$  – коэффициент весомости, зависящий от числа стран, в которых получены патенты, и от важности стран для экспорта изделия;  $N_i$  – число составных частей, защищенных патентами (по группам значимости).

Коэффициенты весомости  $K_i$  и  $m$  определяются экспертным методом.

Патентование частей изделия за рубежом одновременно в нескольких странах при значительной вероятности последующей экспортной поставки существенно повышает показатели патентной защиты изделия.

Рассмотрим в качестве примера РЭС, состоящую из 100 составных частей, из которых 10 особо важных, 20 основных и 70 вспомогательных. Из них авторскими свидетельствами защищены две особо важные части (в том числе, внешний вид защищен в качестве промышленного образца), четыре основные и 10

вспомогательных частей. Защищены патентами в четырех странах одна особо важная часть (внешний вид), две основные и три вспомогательные части. Значит,  $N=100$ ;  $N_1=2$ ;  $N_2=4$ ;  $N_3=10$ ;  $N_4=1$ ;  $N_5=2$ ;  $N_6=3$ ;  $K_1=1$ ;  $K_2=0.7$ ;  $K_3=0.05$ .

Принимая во внимание, что имеются четыре страны патентования по 0.5 балла за каждую страну, из которых в одной проявлен интерес к приобретению лицензии, что дает еще один балл, получаем, что  $m=3$ .

Вычисляем показатели:

$$\Pi_{n.3} = \frac{1 \cdot 2 + 0,7 \cdot 4 + 0,05 \cdot 10}{100} = 0,53;$$

$$\Pi_{\pi.3} = \frac{3(1 \cdot 1 + 0,7 \cdot 2 + 0,05 \cdot 3)}{100} = 0,0765;$$

$$\Pi_{\pi.3} = 0,53 + 0,0765 = 0,13.$$

Показатель патентной чистоты количественно характеризует возможность реализации изделия в России и за рубежом и вычисляется по формуле

$$\Pi_{\pi.4} = \frac{N - \sum_{i=1}^s K_i N_i}{N},$$

где  $N_i$  – число составных частей изделия, подпадающих под действие патентов в данной стране (по группам значимости);  $K_i$  – весовой коэффициент составных частей, подпадающих под действие патентов в данной стране (по группам значимости).

Показатель патентной чистоты для изделий, обладающих патентной чистотой в отношении данной страны, равен единице. Учитывая территориальный характер действия патента, показатель патентной чистоты следует определять отдельно для России и для каждой страны предполагаемого экспорта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пестряков В.Б. Конструирование радиоэлектронных средств: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь. 1992. – 432 с.
2. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств: Учебник для радиотехнических специальностей вузов. – М.: Высшая школа. 1990. – 432 с.
3. Микроэлектроника: Учебное пособие для вузов в 9 книгах. /Под редакцией Л.А. Коледова. Книга 8. Микроэлектронная аппаратура/ Л.А. Коледов, Э.М. Ильина. – М.: Высшая школа. 1987. – 128 с.
4. Савельев А.Я., Овчинников В.А. Конструирование ЭВМ и систем: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа. 1989. – 312 с.
5. Курейчик В.М. Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь. 1990. – 352 с.
6. Дульнев Г.Н. Методы расчета теплового режима приборов. – М.: Радио и связь. 1990. – 312 с.
7. Деньдобренко Б.Н., Малика А.С. Автоматизация конструирования РЭА: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа. 1980. – 384 с.
8. Фрумкин Г.Д. Расчет и конструирование радиоаппаратуры: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа. 1989. – 463 с.
9. Гелль П.П., Иванов-Есимович Н.К. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры. – Л.: Энергия. 1972. – 230 с.
10. Варламов Р.Г. Справочник конструктора радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Советское радио. 1973. – 493 с.
11. Испытание радиоэлектронной аппаратуры и испытательское оборудование / Под редакцией А.Н.Коробова. Учебное пособие. – М.: Радио и связь. 1987. – 272 с.
12. Резиновский А.Я. Испытания на надежность радиоэлектронных комплексов. – М.: Радио и связь. 1985. – 168 с.
13. Кейзман В.Б. Оценка и обеспечение надежности радиоэлектронной аппаратуры: Учебное пособие. – Воронеж: ВПИ. 1987. – 82 с.
14. Яншин А.А. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности ЭВА. – М.: Радио и связь. 1983. – 312 с.
15. Ушаков Н.Н. Технология производства ЭВМ: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа. 1991. – 416 с.
16. Управление качеством электронных средств: Учебник для вузов. /А.П. Глудкин, А.И. Коробов и др.; Под редакцией А.П. Глудкина. – М.: Высшая школа. 1994. – 414 с.
17. Матсон Э.А. Конструкции и технология микросхем: Учебное пособие для вузов. – Минск: Высшая школа. 1985. – 207с.
18. Патентный Закон Российской Федерации // Интеллектуальная собственность. – 1992. – №1–2. – с.4–17.

**Учебное издание**

**Болгов Александр Тимофеевич  
Пасмурнов Сергей Михайлович**

**ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

**Редактор Т.А. Щепкина  
Выпускающий редактор И.В.Медведева  
Компьютерный набор С.М.Пасмурнов**

**ЛР № 066815 от 25. 08. 1993 Подписано в печать 05.01.2004  
Формат 60\*84/16. Бумага для множительных аппаратов аппаратов  
Усл. печ. листов 14,3  
Уч.изд.-л.11,8. Тираж 120 экз. Зак. № 550**

**Воронежский государственный технический университет  
394026. Воронеж, Московский проспект, 14**