

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Полоцкий государственный университет»

**КОНСТРУИРОВАНИЕ  
И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА  
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС  
для студентов специальности 1-39 01 01  
«Радиотехника»

Составление и общая редакция  
Т. В. Молодечкиной

Новополоцк  
«ПГУ»  
2008

УДК 621.396.6(075.8)  
ББК 32.844-02я73  
К 65

Рекомендован к изданию методической комиссией  
радиотехнического факультета  
в качестве учебно-методического комплекса  
(выписка из протокола № 8 от 20.10.2007)

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

Л. М. ЛЫНЬКОВ, д-р техн. наук, проф.,  
зав. каф. защиты информатизации УО «БГУИР»;  
В. Ф. ЯНУШКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц. каф. радиоэлектроники

**Конструирование и технология производства радиоэлектронных средств:** учеб.-метод. комплекс / сост. и общ. ред. Т. В. Молодечкиной. – Новополоцк : ПГУ, 2008. – 168 с.  
ISBN 978-985-418-624-5.

Материал изложен с учетом стандарта специальности и учебного плана. Приведены темы изучаемого курса, их объем в часах лекционных и лабораторных занятий, опорный конспект лекций, вопросы к экзамену, рекомендуемая литература.

Предназначен для студентов, магистрантов, аспирантов радиотехнических специальностей, преподавателей высших и средних учебных заведений, инженерно-технических работников.

**УДК 621.396.6(075.8)**  
**ББК 32.844-02я73**

**ISBN 978-985-418-624-5**

© Молодечкина Т. В., составление, 2008  
© Оформление. УО «Полоцкий государственный университет», 2008

## СОДЕРЖАНИЕ

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА .....	6
ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС .....	10
Введение .....	10
<b>Раздел 1. Этапы развития конструирования и технологии производства РЭС различных поколений</b> .....	<b>12</b>
Тема 1.1. Условия использования и технико-экономические характеристики РЭС .....	12
1.1.1. Основные определения .....	12
1.1.2. Основные задачи процесса конструирования .....	13
1.1.3. Этапы развития конструкций РЭС .....	15
1.1.4. Условия использования и климатическое исполнение РЭС .....	17
1.1.5. Категории размещения изделий РЭС .....	18
1.1.6. Характеристики факторов, действующих на РЭС в различных эксплуатационных условиях .....	20
1.1.7. Технические требования, предъявляемые к РЭС, и эксплуатационные характеристики .....	23
1.1.8. Группы показателей качества конструкций РЭС .....	25
Тема 1.2. Особенности конструкций, структура и классификация РЭС .....	26
1.2.1. Особенности конструкций и структура РЭС .....	26
1.2.2. Особенности модульной компоновки РЭС. Базовые несущие конструкции .....	28
1.2.3. Классификация РЭС .....	30
1.2.4. Особенности проектирования наземной РЭС .....	30
1.2.5. Особенности проектирования морской РЭС .....	32
1.2.6. Особенности проектирования бортовой РЭС .....	34
1.2.7. Конструкционные материалы .....	37
<b>Раздел 2. Взаимозаменяемость и допуски</b> .....	<b>42</b>
Тема 2.1. Краткие сведения о системе допусков и посадок .....	42
2.1.1. Основные понятия и определения .....	42
2.1.2. Краткие сведения о системе допусков и посадок .....	44
2.1.3. Отклонения формы и расположения поверхностей .....	48
Тема 2.2. Взаимозаменяемость по шероховатости .....	49
2.2.1. Параметры шероховатости .....	49
2.2.2. Технологические методы получения тонкообработанных поверхностей .....	52
<b>Раздел 3. Проектирование и технология печатного монтажа</b> .....	<b>54</b>
Тема 3.1. Общие понятия, классификация, материалы для изготовления печатных плат .....	54
3.1.1. Общие понятия, классификационные признаки и основные конструктивно-технологические разновидности печатных плат .....	54
3.1.2. Материалы для изготовления ПП .....	58
Тема 3.2. Технология изготовления ПП .....	60
3.2.1. Методы изготовления ПП .....	60
3.2.2. Формирование рисунка схемы .....	63
3.2.3. Типовые операции техпроцесса изготовления печатных плат .....	67

3.2.4. Методы коммутации .....	69
3.2.5. Конструктивные покрытия печатных плат .....	71
Тема 3.3. Перспективы развития и методы диагностики печатных плат .....	72
3.3.1. Особенности поверхностного монтажа .....	72
3.3.2. Контроль качества и диагностика плат .....	74
<b>Раздел 4. Узлы и блоки с пленочными элементами</b> .....	76
Тема 4.1. Получение пленок невакуумной технологией .....	76
4.1.1. Узлы и блоки с пленочными элементами. Схема процесса получения пленок невакуумной технологией .....	76
4.1.2. Исходные материалы для пленок: проводников, резисторов и диэлектриков .....	78
4.1.3. Материалы подложек и подготовка поверхности .....	79
4.1.4. Особенности получения рабочих рисунков из паст .....	80
4.1.5. Процесс сушки и вжигания .....	81
4.1.6. Основные технологические процессы изготовления полупроводниковых интегральных микросхем .....	82
Тема 4.2. Тонкопленочная технология .....	87
4.2.1. Физико-химические процессы формирования тонкопленочных ИС .....	87
4.2.2. Особенности технологического процесса создания тонкопленочных элементов .....	89
4.2.3. Способы получения тонких пленок .....	89
4.2.4. Требования, предъявляемые к материалам и качеству поверхности подложки .....	91
4.2.5. Основные свойства тонких металлических пленок .....	92
4.2.6. Основные свойства изоляционных пленок .....	93
Тема 4.3. Пленочные резисторы .....	94
4.3.1. Конструирование пленочных резисторов .....	94
4.3.2. Выбор технологии и материалов .....	96
4.3.3. Расчет основных геометрических размеров резистора .....	98
4.3.4. Определение паразитных параметров .....	100
Тема 4.4. Пленочные конденсаторы .....	101
4.4.1. Конденсаторы. Выбор технологии и материалов .....	101
4.4.2. Выбор типа конструкции. Расчет основных размеров элементов конденсаторов .....	105
4.4.3. Оценка паразитных параметров конденсаторов .....	106
<b>Раздел 5. Защита от внешних факторов</b> .....	108
Тема 5.1. Защита от механических воздействий .....	108
5.1.1. Анализ механических сил, действующих на РЭС .....	108
5.1.2. Реакция РЭС и их элементов на механические воздействия .....	109
5.1.3. Способы виброзащиты конструкций РЭС .....	110
5.1.4. Оценка виброзащищенности радиоаппаратуры .....	112
Тема 5.2. Защита РЭС от теплового воздействия .....	115
5.2.1. Тепловой баланс и тепловой режим изделий .....	115
5.2.2. Виды теплообмена в конструкциях .....	117
5.2.3. Классификация систем охлаждения .....	121
5.2.3.1. Естественное воздушное охлаждение .....	123

5.2.3.2. Принудительное воздушное охлаждение .....	124
5.2.3.3. Жидкостное охлаждение .....	125
5.2.3.4. Системы испарительного охлаждения .....	127
Тема 5.3. Защита РЭС от влаги .....	130
5.3.1. Защита элементов конструкции РЭС от влаги. Механизм действия влаги на поверхность металлической детали .....	130
5.3.2. Способы влагозащиты РЭС .....	131
5.3.3. Защита конструкций РЭС от агрессивной внешней среды с помощью покрытий .....	133
5.3.4. Защита конструкций герметизацией .....	136
<b>Раздел 6. Конструирование РЭС .....</b>	<b>139</b>
Тема 6.1. Электрические соединители .....	139
6.1.1. Контакты электрических соединителей .....	139
6.1.2. Виды электрических соединений в конструкциях РЭС .....	140
Тема 6.2. Эргономические показатели и их учет при проектировании РЭС .....	144
6.2.1. Основы учета психофизиологических факторов при разработке РЭС .....	144
6.2.2. Обеспечение эстетических качеств РЭС .....	148
6.2.3. Особенности внешнего оформления профессиональных и бытовых РЭС .....	149
Тема 6.3. Основное назначение и содержание стадий разработки РЭС .....	152
6.3.1. Уровни проектирования РЭС .....	152
6.3.2. Стадии разработки конструкторской документации .....	153
Тема 6.4. Конструкторская документация .....	156
6.4.1. Комплектность конструкторской документации .....	156
6.4.2. Виды и типы схем. Схема как конструкторский документ .....	156
6.4.3. Правила выполнения схемы электрической принципиальной .....	159
6.4.4. Система обозначений конструкторской документации .....	163
<b>ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ .....</b>	<b>165</b>

# РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

## Цели и задачи дисциплины

Она предусматривает наличие у студентов базовых теоретических знаний по математике, механике, тепломассообмену.

Целью изучения дисциплины является ознакомление студентов с основами конструирования и технологией изготовления РЭС.

В результате освоения дисциплины «Конструирование и технология производства радиоэлектронных средств» студент должен:

### **знать:**

- основные принципы, методы и средства конструирования РЭС различных видов и классов;
- основы взаимозаменяемости;
- назначение и содержание стадий разработки РЭС;
- методы защиты РЭС от дестабилизирующих факторов;
- особенности и возможности типовых технологических процессов при изготовлении РЭС.

### **уметь характеризовать:**

- эксплуатационные характеристики РЭС;
- условия использования и технико-экономические показатели РЭС;

### **уметь анализировать:**

- устойчивость к действию внешних факторов;

### **приобрести навыки:**

- использования принципов, методов и средств конструирования РЭС;

## Виды занятий и формы контроля знаний

Виды занятий, формы контроля знаний	Дневная полная форма обучения
Курс	2
Семестр	4
Лекции, ч	32
Экзамен (семестр)	4
Зачет (семестр)	–
Практические (семинарские), ч	–
Лабораторные занятия, ч	32
Расчетно-графические работы (семестр)	–
Контрольные работы (семестр)	–
Курсовая работа (семестр/ ч)	–
Курсовой проект (семестр/ ч)	–
Управляемая самостоятельная работа, ч	–

Программа рассчитана на 64 учебных часа: лекций – 32 ч, лабораторных занятий – 32 ч.

## Содержание дисциплины

### Лекционный курс

№	Наименования разделов и тем лекций, их содержание	Кол-во часов
1	Введение. РАЗДЕЛ 1. Этапы развития конструирования и технологии производства РЭС различных поколений. Тема 1.1. Условия использования и технико-экономические характеристики РЭС	4
2	Тема 1.2. Особенности конструкций, структура и классификация РЭС	2
3	РАЗДЕЛ 2. Взаимозаменяемость и допуски. Тема 2.1. Краткие сведения о системе допусков и посадок	1
4	Тема 2.2. Взаимозаменяемость по шероховатости	1
5	РАЗДЕЛ 3. Проектирование и технология печатного монтажа. Тема 3.1. Общие понятия, классификация, материалы для изготовления печатных плат	2
6	Тема 3.2. Технология изготовления печатных плат	2
7	Тема 3.3. Перспективы развития и методы диагностики печатных плат	2
8	РАЗДЕЛ 4. Узлы и блоки с пленочными элементами. Тема 4.1. Получение пленок невакуумной технологией	2
9	Тема 4.2. Тонкопленочная технология	2
10	Тема 4.3. Пленочные резисторы	2
11	Тема 4.4. Пленочные конденсаторы	2
12	РАЗДЕЛ 5. Защита от факторов. Тема 5.1. Защита от механических воздействий	2
13	Тема 5.2. Защита РЭС от теплового воздействия	2
14	Тема 5.3. Защита РЭС от влаги	2
15	РАЗДЕЛ 6. Конструирование РЭС. Тема 6.1. Электрические соединители	2
16	Тема 6.2. Эргономические показатели и их учет при проектировании РЭС	2
17	Тема 6.3. Основное назначение и содержание стадий разработки РЭС	2
18	Тема 6.4. Конструкторская документация. Заключение	2
	ВСЕГО	32

## Лабораторные занятия

№	Наименование лабораторных работ, время их выполнения	Кол-во часов
1	Исследование характеристик керамических терморезисторов	4
2	Исследование отклонений выходных параметров усилительного каскада с учетом влияния температуры	4
3	Изучение экранирующих свойств конструкционных материалов	4
4	Исследование характеристик катушек индуктивностей и дросселей	4
5	Создание схемы электрической принципиальной в САПР P-CAD	4
6	Исследование тепловых характеристик радиаторов	4
7	Проектирование силовых трансформаторов на кольцевых магнито-проводах	4
8	Изучение конструктивно-технологических особенностей жгутового монтажа	4
ВСЕГО		32

## Учебно-методические материалы по дисциплине

### Литература основная

1. Автоматизация и механизация сборки и монтажа узлов на печатных платах / под ред. В. Г. Журавского. – М.: Радио и связь, 1982.
2. Алексеев, О. В. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов / О.В. Алексеев [и др.]; под ред. О. В.Алексеева. – М.: Высш. шк. – 2000.
3. Алексеев, В. Ф. Принципы конструирования и автоматизации проектирования РЭУ: учеб. пособие / В. Ф. Алексеев. – Минск: БГУИР. – 2003.
4. Ануфриев, Л. П. Коммутационные платы электронной аппаратуры: учеб. пособие / Л. П. Ануфриев, В. Л. Ланин, А. А. Хмыль. – Минск: БГУИР. – 2000.
5. Каленкович, Н. И. Механические воздействия и защита РЭА: учеб. пособие для вузов / Н. И. Каленкович, Е. П. Фастовец, Ю. В. Шамгин. – Минск: Выш. шк. – 1989.
6. Ланин, В. Л. Технология сборки, монтажа и контроля в производстве электронной аппаратуры / В. Л. Ланин. – Минск: Инпредо. – 1997.
7. Ненашев, А. П. Конструирование радиоэлектронных средств: учеб. для радиотехнич. спец. вузов / А. П. Ненашев. – М.: Высш. шк. – 1990.
8. Пикуль, М. И. Конструирование и технология производства ЭВМ: учеб. / М. И. Пикуль, И. М. Русак, Н. А. Цырельчук. – Минск: Выш. шк. – 1996.
9. Роткоп, Л. Л. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры / Л. Л. Роткоп, Ю. Е. Спокойный. – М.: Сов. радио. – 1976.
10. Савельев А. Я. Конструирование ЭВМ и систем: учеб. для вузов по спец. «Выч. маш., компл., сист. и сети» / А. Я. Савельев, В. А. Овчинников. - М.: Высш. шк. – 1989.
11. Кундас, С. П. Технология поверхностного монтажа: учеб. пособие / С. П. Кундас [и др.]. – Минск: Армита-Маркетинг, -Менеджмент. – 2000. – 357 с.: ил.
12. Достанко, А. П. Технология радиоэлектронных устройств и автоматизация производства: учеб. / А. П. Достанко [и др.]. – Минск: Выш. шк. – 2002.

### **Литература дополнительная**

13. Богущ, В. А. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты / В. А. Богущ [и др.]; под ред. Л. М. Лынькова. – Минск: Бестпринт, 2003. – 406 с.: ил.
14. Куземин, А. Я. Конструирование и микроминиатюризация электронно-вычислительной аппаратуры: учеб. пособие для вузов / А. Я. Куземин. – М.: Радио и связь. – 1985.
15. Левин, А. П. Расчет вибропрочности конструкции РЭА / А. П. Левин, Н. Э. Сватикова. – М.: МИРЭА. – 1983.
16. Мевис, А. Ф. Допуски и посадки деталей радиоэлектронной аппаратуры: справочник / А. Ф. Мевис, В. Б. Несвижский, А. И. Фефер; под ред. О. А. Луппова. – М.: Радио и связь. – 1984.
17. Романычева, Э. Т. Разработка и оформление конструкторской документации РЭА: справочник / Э. Т. Романычева [и др.]. – М.: Радио и связь. – 1989.
18. Соломахо, В. Л. Справочник конструктора-приборостроителя / В. Л. Соломахо [и др.]. – Минск: Выш. шк. – 1983.
19. Барканов, Н. А. Справочник конструктора РЭА: Компоненты, механизмы, надежность / Н. А. Барканов [и др.]; под ред. Р. Г. Варламова. – М.: Радио и связь. – 1985.
20. Ушаков, Н. Н. Технология производства ЭВМ: учеб. для студ. вузов по спец. «Вычислит. машины, комплексы и сети» / Н. Н. Ушаков. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш.шк., 1991.
21. Черняев, В. Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров / В. Н. Черняев. – М.: Радио и связь, 1987.
22. Уваров, Л. С. PCAD: проектирование и конструирование электронных устройств / Л. С. Уваров. – М.: Телеком, 2004. – 760 с.
23. Грачев, А. А. Конструирование электронной аппаратуры на основе поверхностного монтажа компонентов / А. А. Грачев, А. А. Мельник, Л. И. Панов. – М.: НТ Пресс, 2006. – 384 с.: ил.
24. Компоновка и конструкции микроэлектронной аппаратуры: справочное пособие / П. И. Овсицер [и др.]; под ред. Б. Ф. Высоцкого, В. Б. Пестрякова, О. А. Пятлина. – М.: Радио и связь, 1982. – 208 с.: ил.
25. Основы конструирования радиоэлектронной аппаратуры: учеб.-метод. пособие для студ. спец. 1-01 03 00 «Экономика и управление на предприятии» и 1-02 02 00 «Маркетинг» дневной и заоч. форм обуч. / Н. И. Каленкович, Н. С. Образцов, А. М. Ткачук. – Минск: БГУИР, 2006. – 150 с.

# ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

## ВВЕДЕНИЕ

Производство радиоэлектронной аппаратуры в настоящее время развивается высокими темпами. Радиоэлектронная и вычислительная техника прочно вошли во многие сферы деятельности человека в самых разнообразных формах – от простейших электрических схем до сложнейших вычислительных комплексов, включающих в себя тысячи компонентов.

Современный этап развития радиоэлектронных средств характеризуется повышением функциональной сложности, уровня интеграции, быстродействия и тепловыделения элементной базы. Все это приводит к увеличению сложности конструкций и повышению требований к их производству, эффективности работы и т.п. В последние годы четко прослеживается тенденция усиления взаимосвязи решений схемотехнических вопросов проектирования и конструкторско-технологических. То есть конструкции узлов и устройств сложного радиоэлектронного устройства в результате развития элементной базы и повышения сложности изделий определяют не только механические, технологические и надежность параметры, но и электронные.

Жизненный цикл изделия можно представить в виде последовательных взаимосвязанных этапов: «рождение» – «жизнь» – «смерть». Решение задач по оптимальному проектированию и производству изделия должно осуществляться комплексно на основе учета всех этих этапов, в процессе взаимодействия с окружающей средой и человеческим обществом.

На первый план в процессе создания нового изделия выходят вопросы обеспечения быстродействия, помехоустойчивости, электромагнитной и тепловой совместимости, технологичности, стоимости. Поэтому основополагающим принципом при разработке нового изделия является системный подход. Он базируется на рассмотрении изучаемого объекта во взаимосвязи с окружающими объектами. Задачами системного подхода являются исследование специфических связей, установление закономерностей, присущих отдельным типам систем, разработка на этой основе определенных методов их описания и изучения.

Основное требование при проектировании радиоэлектронного изделия состоит в том, чтобы создаваемое устройство было эффективнее своего аналога, т.е. превосходило его по качеству функционирования, степени

миниатюризации и технико-экономической целесообразности. Выбор конструкции зависит от назначения и области применения устройства, заданных электрических параметров и условий эксплуатации, конструктивных показателей, сроков разработки и серийности, стоимости и возможностей существующей элементной базы. Современные методы конструирования должны обеспечивать: снижение стоимости, в том числе и энергоемкости; уменьшение объема и массы; расширение области использования микроэлектронной базы; увеличение степени интеграции, микроминиатюризацию межэлементных соединений и элементов несущих конструкций; электромагнитную совместимость и интенсификацию теплоотвода; взаимосвязь оператора и аппаратуры; широкое внедрение методов оптимального конструирования; высокую технологичность, максимальное использование стандартизации. Ускорение и удешевление проектно-конструкторских работ возможно как за счет обоснованного применения типовых базовых конструкций, так и путем внедрения автоматизированных методов проектирования.

Современный этап развития аппаратуры связан с использованием нового поколения электронных компонентов и внедрением технологии поверхностного монтажа, развитием наноэлектроники. В этих условиях от разработчиков радиоэлектронной аппаратуры требуются знания физико-химических основ процессов изготовления компонентов, плат, материалов, их установки и пайки, умения использовать автоматизированные методы проектирования.

## Раздел 1

### ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА РЭС РАЗЛИЧНЫХ ПОКОЛЕНИЙ

#### Тема 1.1 УСЛОВИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЭС

##### 1.1.1. Основные определения

**Проектирование** – разработка основных показателей того конечного изделия, для которого оно проводится, и путей их практической реализации. Результатом процесса проектирования является конструкция.

**Конструирование** – это объективный процесс организации, выявления и отражения в конструкторской и технологической документации электрических, механических, тепловых и других связей между элементами изделия.

Организация связей предполагает создание монтажных, электрических принципиальных схем, макетирование и наладку реальных приборов и систем, создание тепловых и других макетов, их проверку и совершенствование.

**Конструкция** – искусственно создаваемая человеком совокупность физических тел и веществ, имеющая законченные формы, характеризующаяся определенными параметрами и предназначенная для выполнения необходимых функций в заданных условиях. Понятие «конструкция» всегда связывается с активной деятельностью человека. Свойства и параметры конструкции зависят от взаимосвязей составных частей изделия, а также от связей изделия с окружающей средой и человеком.

Запись конструкции (по сути, конструкторская часть проектирования, или конструирование) связана с установлением размеров, видов, форм, обработок и некоторых других параметров. Она осуществляется с помощью технических чертежей, фотографий, макетов или в шинной форме с использованием ЭВМ, т.е. в **конструкторской документации**.

**Конструкторская документация** – это совокупность документов, содержащих в зависимости от их назначения данные, необходимые для

разработки, изготовления, контроля, приемки, поставки, эксплуатации и ремонта изделия.

### 1.1.2. Основные задачи процесса конструирования

Главная **цель** процесса конструирования – создавать малогабаритную, высокоэффективную и надежную РЭС, производство и эксплуатация которой требует ограниченного расхода трудовых, энергетических и материальных ресурсов. Для достижения этой цели требуется решить **четыре основные задачи** современного конструирования:

1. комплексной микроминиатюризации;
2. охлаждения;
3. повышения технологичности.
4. электромагнитной совместимости.

Основой при решении **задачи комплексной миниатюризации РЭС** является поиск резервов миниатюризации всех составных частей, не ограничиваемый только узлами, в которых для миниатюризации можно применить ИС, построив на них электрическую схему. Задача должна решаться путем выбора соответствующей элементной базы, частей всех структурных уровней, системы питания, охлаждения, автоматики, антенных систем и т.д.

Решение задачи комплексной миниатюризации РЭС начинается с формулирования технических требований к проектированию РЭС в отношении максимального снижения габаритов, массы и энергопотребления. Оно должно осуществляться по схемотехническому и конструкторскому направлениям взаимосвязано и согласованно. Конструктор должен решить три главных вопроса:

- о структуре конструкции РЭС;
- о материалах;
- об элементной базе.

При *выборе оптимальной структуры* конструкции РЭС по критерию комплексной миниатюризации необходимо переходить к 5-му поколению, т.е. использовать интегральные схемы большие (ИСБ), узлы гибридно-интегральные крупноформатные (УГИК), волоконно-оптические кабели и соединители (БОКС).

При *выборе материалов* для несущих конструкций следует применять облегченные высокопрочные материалы, приводящие к уменьшению себестоимости готовой детали. Для обеспечения комплексной миниатюризации элементной базы необходимо обеспечить техническую совмести-

мость отдельных элементов друг с другом и с применяемыми ИС. Наибольшую сложность вызывают вопросы выбора элементов автоматики, электропривода, коммутационных компонентов. За последние годы благодаря известным достижениям в области микроминиатюризации удалось уменьшить объем отдельных РЭС более чем на два порядка, однако, до настоящего времени проблемы миниатюризации некоторых видов РЭС (антенные, передающие устройства и др.) полностью не решены.

Вторая задача современного конструирования РЭС – **охлаждение** – является наиболее сложной, она возникла как побочное следствие миниатюризации. Без тщательно продуманного и выполненного охлаждения нельзя обеспечить надежность и эффективность современной РЭС. Задачи охлаждения разбиваются на две части:

- теплоотвод внутренний;
- теплоотвод внешний.

Наиболее трудным является *внутренний теплоотвод* – отвод тепла от первичных тепловыделяющих элементов, расположенных внутри конструкции. Для успешного решения в современных конструкциях применяют теплостоки с использованием псевдотеплопроводимости тепловых трубок.

Третья задача – **повышение технологичности** – решается на основе унификации и стандартизации. Избыточное разнообразие существующих в настоящее время конструкторских и схемотехнических решений резко снижает технологичность, порождает мелкосерийность и многономенклатурность.

Следует рассматривать производственную и эксплуатационную технологичность конструкции. Производственная технологичность – это трудовые и материальные затраты, расходуемые на изготовление изделия. Эксплуатационная технологичность характеризуется свойствами предупредить, обнаруживать, устранять отказы и неисправности в минимальные промежутки времени. На технологичность изделия значительное влияние оказывает схемная сложность основного конструктивного элемента – печатной платы с ЭРЭ, МС и микросборок. Вопросы повышения технологичности могут решаться при назначении допусков на обработку детали. Так, понижение точности изготовления деталей на один класс снизит производственные расходы на обработку почти в четыре раза.

При решении задачи по **обеспечению электромагнитной совместимости** необходимо учитывать увеличение степени интеграции элементной базы (что приводит к усилению паразитных связей, наводок, внутренних помех). Задача решается путем поиска оптимальных компоновок пе-

чатных плат. Для уменьшения индуктивных и емкостных связей проводники в соседних слоях располагают в перпендикулярных направлениях. Уменьшение емкости достигается путем уменьшения ширины проводников, однако при этом следует помнить, что увеличивается сопротивление проводников. Для снижения наводок следует применять минимальное количество печатных проводников большой длины.

### **1.1.3. Этапы развития конструкций РЭС**

Процесс развития РЭС обусловлен требованиями постоянного усложнения выполняемых функциональных задач и расширением областей применения. При этом функциональная сложность устройств за каждое пятилетие увеличивается примерно в 10 раз. Функциональная сложность, в свою очередь, определяет аппаратную сложность и обычно оценивается числом схемных или активных элементов. С увеличением последней возникает проблема, как разрешить противоречия в цепочке взаимодействующих и часто противоречивых факторов: сложность – надежность – масса (объем) – энергопотребление – стоимость – сроки разработки. Решение этой проблемы, как показывает весь процесс развития РЭА, возможно и должно заключаться в создании и совершенствовании новой элементной базы, новых методов конструирования и формообразования, новой технологии изготовления, что определяет смену «поколений» РЭА. Так, за истекший полувековой период развития произошла смена нескольких поколений РЭА. Основным отличительным признаком поколения РЭА считается элементная база и метод конструирования.

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

Конструкционное исполнение первых РЭС напоминало аппаратуру проводной связи (деревянный ящик, монтаж неизолированным проводом, контактирование с помощью винтов). Установка РЭС на суда и автомобили (1925 – 1935 гг.) показала необходимость увеличения прочности и экранирования отдельных узлов с помощью металлического шасси. Увеличение серийности выпуска аппаратуры привело к созданию конструкторской иерархии (унификации и соподчиненности несущих базовых конструкций). Для защиты аппаратуры танков и самолетов (1935 – 1945 гг.) были разработаны герметичные корпуса, которые устанавливались на виброизоляторы (амортизаторы). Требование существенной минимизации массы и объема ракетной аппаратуры (1940 – 1950 гг.) привело к созданию микро-

модулей, печатных плат, полупроводниковых приборов, коаксиальных кабелей, полосковых линий, интегральных микросхем. Дальнейшее усложнение аппаратуры в 1960 – 1970 гг. привело к появлению элементов функциональной электроники.

Современная электронная аппаратура характеризуется высокой интеграцией и технологичностью, малой массой и повышенной надежностью. Эти показатели обеспечиваются благодаря достижениям в области создания нового поколения электронных компонентов, технологии и оборудования для поверхностного монтажа. Развитие техники поверхностного монтажа компонентов объясняется экономическими соображениями, т.к. позволяет уменьшать габариты электронной аппаратуры, снизить расход материалов и энергии, объем и массу конструкций радиоэлектронных и вычислительных средств.

В настоящее время условились делить все РЭС на пять поколений.

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

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

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

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

В РЭС *пятого поколения* находят применение приборы функциональной микроэлектроники. Функциональная микроэлектроника предполагает принципиально новый подход, позволяющий реализовать определённую функцию аппаратуры без применения стандартных базовых элементов, используя физические явления в твердых телах. При этом локальному объёму твердого тела придаются такие свойства, которые необходимы для выполнения данной функции, и промежуточный этап представления этой функции в виде эквивалентной электрической схемы не требуется. Функ-

циональные микросхемы могут выполняться не только на основе полупроводников, но и на основе таких материалов, как сегнетоэлектрики, материалы с фотопроводящими свойствами и др. Для переработки информации можно использовать явления, не связанные с электропроводностью (например, оптические и магнитные явления в диэлектриках, закономерности распространения ультразвука и т.д.). С течением времени изменялось и понятие РЭС. Вначале использовалось понятие «аппаратура». Аппаратура, используемая для решения технических задач обнаружения целей, наведения, навигации и т.д., называлась радиотехнической аппаратурой. Развитие ЭВМ и систем автоматики привело к появлению понятия «электронная аппаратура». Дальнейшее усложнение аппаратуры привело к понятию «радиоэлектронная аппаратура». Введение в состав аппаратуры различных электромеханических устройств, систем питания, теплоотвода и контроля привело к понятию «радиоэлектронное средство».

#### **1.1.4. Условия использования и климатическое исполнение РЭС**

Конструктивное исполнение РЭА во многом определяется макроклиматическим районом их эксплуатации.

В соответствии с **ГОСТ 15150-69** по воздействию климатических факторов внешней среды рассматриваются 10 разновидностей исполнения изделий:

- **У** – для умеренного климата со среднегодовым максимумом и минимумом рабочих температур 313 и 228 К;
- **УХЛ** – для умеренного и холодного климата, когда абсолютные минимумы температуры воздуха ниже 228 К;
- **ТВ** – для влажного тропического климата, где сочетание температуры (равной или выше 293 К) и относительной влажности (равной или выше 80 %) наблюдается примерно 12 ч или более в сутки за непрерывный период (от 2 до 12 месяцев в году);
- **ТС** – для районов сухого тропического климата, в которых средняя ежегодная абсолютная максимальная температура воздуха выше 313 К и которые не отнесены к макроклиматическому району с влажным тропическим климатом;
- **Т** – как для сухого, так и для влажного тропического климата;
- **О** – для любого климата (общеклиматическое);
- **М** – для умеренно холодного климата (в районах морей, океанов или непосредственно на морском берегу, если эти районы расположены севернее 30° северной широты и южнее 30° южной широты);

- **ТМ** – для тропического морского климата при нахождении изделия в морях и океанах между 30° северной широты и 30° южной широты;
- **ОМ** – общеклиматическое морское исполнение для кораблей с неограниченным районом плавания;
- **В** – всеклиматическое исполнение для суши и моря (кроме Антарктиды).

При выборе того или иного климатического исполнения разработчику РЭС следует также учитывать содержание в окружающей атмосфере коррозионно-активных агентов. Для характеристики указанных воздействий нормативной документацией определены четыре основных типа атмосферы, приведенные в табл. 1.1.

Таблица 1.1

**Разновидности атмосферы по коррозионному воздействию на РЭС**

Тип атмосферы		Климатическое исполнение РЭС, обеспечивающее экономически целесообразную защиту от атмосферы
Обозначение	Наименование	
I	Условно-чистая	У, УХЛ, ТС, Т, ТВ
II	Промышленная	У, УХЛ, ТС, Т, ТВ
III	Морская	М, ТМ, ОМ, В
IV	Приморско-промышленная	О, В

Коррозионную активность атмосферы характеризуют увлажнение поверхности материалов и загрязнение воздуха коррозионно-активными агентами.

Увлажнение поверхности изделий может осуществляться фазовой или адсорбционной пленками влаги. Причем в ряде случаев может осуществляться одновременное их проявление.

Параметры загрязнения воздуха коррозионно-активными веществами устанавливаются по концентрации двуокиси серы, хлоридов и аммиака, превышающих фоновую, которая составляет для двуокиси серы и аммиака 0,02 мг/м<sup>3</sup> и для хлоридов – 0,002 мг/м<sup>3</sup>.

### 1.1.5. Категории размещения изделий РЭС

Изделия РЭС различных климатических исполнений изготавливают по определенным категориям размещения, характеризующимся местом их эксплуатации в воздушной среде на высотах до 4300 м.

Действующей нормативной документацией предусмотрено 5 основных укрупненных категорий размещения изделий.

Изделия, предназначенные для эксплуатации на открытом воздухе, относятся к *категории 1*. При этом учитывается воздействие всей совокупности климатических факторов, характерных для того или иного макроклиматического района.

К *категории 2* относятся изделия, предназначенные для эксплуатации в укрытиях типа навеса или в помещениях (объемах) с колебаниями температуры и влажности воздуха, существенно не отличающимися от соответствующих колебаний на открытом воздухе. К числу таких помещений могут относиться металлические помещения без теплоизоляции, кузова и прицепы автомашин и др.

Для эксплуатации в закрытых помещениях (объемах) с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий предназначены изделия, относящиеся к *категории 3*. К числу таких помещений относятся бетонные, каменные и деревянные помещения, а также металлические помещения с теплоизоляцией.

Изделия, предназначенные для эксплуатации в помещениях (объемах) с искусственно регулируемыми климатическими условиями, относят к *категории 4*. Подобными условиями обладают закрытые и отапливаемые либо охлаждаемые и вентилируемые лабораторные, производственные и жилые помещения, в том числе с кондиционированным воздухом, в которых отсутствует воздействие прямого солнечного излучения, атмосферных осадков, ветра, песка и пыли наружного воздуха, существенно уменьшено или полностью отсутствует конденсация влаги,

К *категории 5* относятся изделия, которые используются в помещениях (объемах) с повышенной влажностью. К числу таких помещений могут относиться невентилируемые и неоткрываемые корабельные помещения, шахты, некоторые дома гидрометаллургических производств и др., в которых возможно длительное наличие воды или частая конденсация влаги на стенах и потолке.

Кроме рассмотренных выше основных категорий изделий существует ряд дополнительных категорий. В частности, для РЭС могут представлять практический интерес следующие из них.

*Категория 1.1* охватывает изделия, предназначенные для работы и хранения в условиях категории 4, а также кратковременной работы в других условиях (в том числе на открытом воздухе).

Для обозначения изделий, предназначенных для эксплуатации в качестве встроенных элементов внутри комплектных изделий категории 1, 1.1 и 2, например, внутри РЭС, конструкция которых, исключает возмож-

ность конденсации влаги на встроенных элементах, введена дополнительная *категория 2.1*.

Изделия, используемые в нерегулярно отапливаемых помещениях (объемах), относят к дополнительной *категории 3.1*; в помещениях с кондиционированным или частично кондиционированным воздухом – к дополнительной *категории 4.1*.

Изделия РЭС, предназначенные для эксплуатации в качестве встроенных элементов внутри комплектных изделий категории 5, конструкция которых в части конденсации влаги аналогична ранее рассмотренной категории 2.1, относятся к дополнительной *категории 5.1*.

Приведенные выше основные и дополнительные категории размещения изделий РЭС не распространяются на летательные аппараты, предназначенные для эксплуатации на высотах более 1000 м.

Изготовление подобных изделий осуществляется в зависимости от пониженного атмосферного давления по группам (при разработке и изготовлении РЭС, предназначенных для размещения на высотных летательных аппаратах, важное значение имеет учет ряда дополнительных факторов, связанных с уменьшением плотности воздуха).

Наиболее серьезным фактором, связанным с ростом высоты, является снижение пробивных напряжений электрической изоляции изделий, расположенных вне герметичного отсека или корпуса.

### **1.1.6. Характеристики факторов, действующих на РЭС в различных эксплуатационных условиях**

Радиоэлектронная аппаратура эксплуатируются в условиях воздействия на нее целого ряда систематических и случайных факторов. **Систематические факторы** определяют рабочие функции аппаратуры и могут быть учтены в процессе проектирования РЭС. **Случайные факторы** по своему характеру и времени воздействия проявляются случайным образом, в связи с чем учет их влияния в процессе разработки РЭС достаточно затруднен.

Факторы могут быть субъективными, т.е. зависящими от действий конструктора, технолога и обслуживающего персонала, и объективными, не зависящими от человека.

По характеру воздействия на РЭС объективные факторы разделяются на климатические, биологические, механические, радиационные.

**Климатические факторы** внешней среды включают в себя температуру, влажность воздуха, давление воздуха или газа (высоту над уровнем

моря), солнечное излучение, дождь, ветер, пыль (в том числе снежную), соляной туман, иней, гидростатическое давление воды, действие плесневых грибов, а также содержание в воздухе коррозионно-активных агентов.

**Нормативными** значениями климатических факторов внешней среды принято считать следующие:

- температура  $+25 \pm 10$  °С;
- относительная влажность воздуха 45 – 80 %;
- атмосферное давление – 630 – 800 мм рт. ст.

Воздействие *температуры* приводит к изменению физико-химических и механических свойств материалов и элементов, что оказывает влияние на электрические свойства и параметры РЭС и, как следствие, на количественные характеристики их надежности.

Влияние *влажности* на конструкционные материалы: разрушение исходной структуры вещества или изменение его физических, химических, электрических и механических свойств.

Изменения *давления* воздуха или газа (вызванные, в частности, ростом высоты над уровнем моря) могут привести к последствиям: изменению емкости и допустимых рабочих напряжений конденсаторов с воздушным диэлектриком, изменению величины допустимого пробивного напряжения в изоляторах, а также между проводниками монтажа. С ростом высоты и уменьшением в связи с этим плотности воздуха может произойти фактическое повышение температуры всех видов изделий, в том числе РЭА.

*Солнечное излучение* (ультрафиолетовые лучи, видимое и инфракрасное излучение) вызывает: окисления полярных диэлектриков; химическое разложение органических материалов; поверхностное окисление материалов и ухудшение их физико-химических и электрических свойств; старение материалов.

Влияние *пыли и песка* на работу РЭС: увеличивается емкость конденсаторов с воздушным диэлектриком; увеличиваются электростатические заряды; увеличиваются шумы; ускоряется износ контактов; возникают замыкания на печатных платах; абразивное воздействие на наружные поверхности.

*Соляной туман* способствует возникновению коррозии.

При эксплуатации РЭС под водой на конструкцию воздействует гидростатическое давление воды.

*Плесневые грибы* приводят к образованию различного вида кислот, которые вызывают коррозию металлов и способствуют разложению изоляционных материалов. Наиболее подвержены действию плесени наполнители и пластификаторы. Плесенью могут поражаться стеклянные при-

мы и линзы, хорошей питательной средой для нее являются остатки канифоли в местах пайки.

В числе **биологических** факторов серьезную опасность для РЭС представляют различные грызуны, которые способны перегрызть кабели и жгуты, а также термиты, муравьи и другие насекомые.

К **механическим** факторам воздействия на РЭС относят вибрацию, удары, линейные и центробежные ускорения, шум и акустические удары. Все они могут действовать как отдельно, так и в совокупности.

Вибрация проявляется в процессе эксплуатации на подвижном объекте и транспортировки РЭС и представляет собой периодические сложные колебания аппаратуры. Особую опасность представляет вибрация, частота которой близка к собственной резонансной частоте узла или элемента конструкции; при возникновении данного состояния разрушающие усилия могут возрасти в десятки раз. Основными параметрами вибрации являются частота и ускорение.

Удар возникает в случае, когда аппаратура претерпевает быстрое изменение ускорения. Параметрами удара являются ускорение и длительность удара.

Линейные и центробежные ускорения возникают при быстром изменении скорости движения на прямолинейном участке либо во время криволинейного движения. При этом может возникнуть многократное возрастание усилий на элементы крепления РЭС.

Шум и акустические удары вызывают опасную высокочастотную вибрацию конструктивных элементов РЭС. Указанные воздействия проявляются при расположении РЭС вблизи мощных источников шумов, которыми, в частности, являются работающие двигатели летательных аппаратов и пр. Акустический удар можно охарактеризовать мощностью колебаний источника звука, давлением и силой звука.

На борту космических аппаратов и искусственных спутников Земли РЭС оказывается под воздействием невесомости, механического фактора, характеризующегося отсутствием гравитационных сил или равновесием центробежной силы и силы притяжения Земли.

**Радиационные** факторы проявляются в виде космической радиации и облучения ядерными частицами. Последствия космической радиации – возникновение процесса ионизации в материалах, что и воздействует на РЭС, установленные на космических объектах. Характер облучения зависит от вида ядерных частиц, их комбинаций и может вызвать обратимые, полуобратимые и необратимые явления в аппаратуре.

Проявления радиационных факторов и степень их воздействия на свойства РЭС зависят от природы материалов конструктивных элементов. Наиболее устойчивы к радиации металлы, что связано с высокой концентрацией в них свободных носителей зарядов. У органических материалов при облучении ухудшаются механические и диэлектрические свойства. При облучении полупроводников в них образуются дополнительные носители зарядов, искажающие физические процессы, происходящие в *p-n*-переходах

### **1.1.7. Технические требования, предъявляемые к РЭС, и эксплуатационные характеристики**

Технические требования являются важнейшим разделом технических условий (ТУ) и определяют показатели качества и эксплуатационные характеристики изделия.

В зависимости от характера и назначения РЭС должны удовлетворять общим и специальным техническим, конструктивно технологическим, эксплуатационным и экономическим требованиям.

К **общим техническим** требованиям относятся такие, которые не зависят от специфики функционирования или условий эксплуатации аппаратуры. Они являются установившимися для любых РЭС и поэтому оговариваются в различных руководящих технических материалах государственного и ведомственного уровня.

**Специальные** технические требования характеризуют особенности функционирования и эксплуатации разрабатываемой аппаратуры. Они обязательно указываются в техническом задании (ТЗ) на разработку.

Конструктивно-технологические требования направлены на обеспечение функционально-узлового принципа построения, технологичности конструкции, минимальных габаритов и массы, ремонтпригодности, предусмотреть мер защиты от воздействия климатических и механических факторов.

Основные конструктивно-технологические требования можно свести к следующим: взаимозаменяемость блоков, узлов, элементов, деталей; максимальная типизация и унификация приборов и элементов конструкций; максимальное сокращение номенклатуры; минимальная материалоемкость; рациональный выбор покрытий; простота выполнения монтажа и возможность его автоматизации; минимальное число подгоночных и регулировочных операций; простота изготовления, сборки, регулировки; применение типовых и групповых ТП.

К **эксплуатационным** требованиям относятся: надежность, простота управления и обслуживания, ремонтпригодность, габариты и масса.

Исключительно важное значение приобрел комплекс требований, объединенных понятием *надежность*. Эти требования оговаривают безотказность работы РЭС в течение определенного времени, а также долговечность и восстанавливаемость аппаратуры. Следует помнить, что повышение надежности РЭС всегда сопряжено с дополнительными затратами времени, материальных и денежных средств и, как правило, связано с увеличением габаритов и массы РЭС. Поэтому обеспечение надежности на этапе проектирования РЭС должно решаться путем оптимизации конструкции.

*Простота управления и обслуживания РЭС* определяет возможности ее эффективного обслуживания. Чтобы управление РЭС было эффективным, необходимо сокращать число органов управления, располагать органы управления в удобном для оператора месте и проектировать их с учетом физиологических особенностей человека. Простота обслуживания определяется, прежде всего, требованиями к оперативности, удобству и безопасности обслуживания.

*Ремонтпригодность* – это свойство аппаратуры, заключающееся в приспособленности ее к обнаружению и устранению отказов, а также к их предупреждению. Для быстрого устранения отказа конструкция РЭС должна обеспечивать легкий доступ к любому элементу замены, что ограничивает применение вакуумной герметизации или специальных заливочных компаундов. Кроме того, высокая степень ремонтпригодности может повлечь за собой неблагоприятное влияние большого количества разъемных соединений блоков и узлов на основные функциональные характеристики РЭС

*Габариты и масса* имеют особое значение в отдельных типах РЭС, где они во многом предопределяют тактические характеристики всего объекта. Глобальным решением проблемы габаритов и массы РЭС является комплексная микроминиатюризация.

**Экономические требования** определяют минимально возможные затраты времени, труда и материальных средств на разработку, изготовление и эксплуатацию РЭС. На сегодняшний день требования к экономичности конструкции являются обязательными для всех видов РЭС. Экономичность конструкции определяется затратами на ее разработку, производство и эксплуатацию. Задача конструктора состоит в том, чтобы функциональные требования к РЭС оптимальным образом согласовывать с их экономическими характеристиками.

### 1.1.8. Группы показателей качества конструкций РЭС

Важнейшим направлением при конструировании и производстве РЭС является обеспечение качества. Качество изделий – это не только результат производственного процесса; оно формируется также на всех этапах проектирования (в том числе и конструирования) и эксплуатации.

Показатели качества конструкций РЭС можно условно разделить на несколько групп, основными из которых являются следующие:

- назначения;
- надежности;
- технологичности;
- стандартизации и унификации;
- эргономические;
- эстетические;
- патентно-правовые;
- экологические и показатели техники безопасности;
- транспортируемости;
- экономические.

Показатели назначения характеризуют полезный эффект от использования РЭС по назначению и область ее применения. Они показывают функциональные возможности, техническое совершенство и назначение РЭС, ее состав и структуру.

Показатели надежности характеризуют возможность РЭС выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в необходимых пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.

Количественные значения показателей надежности технических средств РЭС устанавливаются для нормальных климатических условий эксплуатации.

Показатели технологичности характеризуют эффективность конструкторско-технологических решений для обеспечения высокой производительности труда при изготовлении, эксплуатации и ремонте изделий.

Показатели стандартизации и унификации характеризуют степень использования в конкретной разработке РЭС стандартизованных деталей, узлов, блоков и других компонентов, а также уровень унификации составных частей конструкции РЭС.

Эргономические показатели характеризуют систему «человек – РЭС – среда». Для многих изделий эти показатели могут быть одними из важ-

нейших. В свою очередь эргономические показатели подразделяются на: гигиенические, антропометрические, физиологические и психологические.

Эстетические показатели характеризуют художественность, выразительность и оригинальность формы РЭС, гармоничность и целостность конструкции, соответствие формы и конструкции РЭС стилю, цветовое и декоративное решение РЭС и т.п.

Патентно-правовые показатели служат для оценки степени патентной чистоты и патентной защиты конструкций РЭС.

Экологические показатели и показатели техники безопасности характеризуют уровень вредных воздействий на окружающую среду, возникающих при изготовлении и эксплуатации изделия (экологические показатели), а также особенности конструкций, обуславливающие при ее изготовлении и эксплуатации безопасность человека (показатели техники безопасности).

Показатели транспортируемости отражают приспособленность конструкций РЭС к транспортированию, к подготовительным и заключительным технологическим операциям, связанным с транспортированием.

Экономические показатели характеризуют затраты на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке конструкций РЭС, на производство и эксплуатацию, на экономическую эффективность при эксплуатации РЭС. Это особый вид показателей, позволяющих оценивать технологичность и ремонтпригодность конструкций, уровень стандартизации, патентную чистоту и т.д.

Между показателями различных групп существуют взаимосвязи, которые необходимо учитывать при проектировании.

## **Тема 2**

### **ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ, СТРУКТУРА И КЛАССИФИКАЦИЯ РЭС**

#### **1.2.1. Особенности конструкций и структура РЭС**

Разработка современной аппаратуры основывается на использовании конструктивно-законченных типовых сборочных единиц – *модулей*. Вопросы рационального модульного конструирования аппаратуры являются одними из важнейших в общей системе обеспечения качества и эффективности РЭС.

В мировой практике наметилось три основных пути реализации данного подхода. Первый из них связан с применением функциональных модулей малой сложности в виде небольшой ПП с установленными на ней

разъемами и радиоэлементами. В данном случае аппаратура создается на основе каталога стандартных по функциям электронных модулей. Второе направление заключается в компоновке РЭС из крупных функционально законченных модулей в виде блоков питания, памяти и др.

Третье направление предусматривает использование модульного принципа конструирования на всех уровнях конструктивной иерархии, когда модули РЭС более высоких уровней состояются из модулей более низких уровней, при этом высший конструктивный уровень модуля обеспечивает полную входимость и функциональную совместимость с модулем низшего конструктивного уровня. Данный подход реализован, в частности, при создании изделий единой системы ЭВМ (ЕС ЭВМ), применительно к которым установлены следующие уровни конструктивных модулей:

- первый – ИМС, ЭРЭ;
- второй – типовой элемент замены – ТЭЗ (плата с установленными на ней микросхемами, кассета);
- третий – панель, блок;
- четвертый – рама;
- пятый – стойка (шкаф), пульт.

По аналогичному принципу при некоторых терминологических и классификационных различиях формируются модульные конструкции других разновидностей РЭС. Причем в значительной части РЭС ряд уровней отсутствует, и первый уровень составляют ячейки, играющие роль ТЭЗ, второй – различные виды блоков, третий – стойки, шкафы, пульта и другие конструкции.

*Ячейкой* называется конструктивно законченная сборочная единица в каркасном или бескаркасном исполнении, состоящая из одной или нескольких ПП с установленными на них ИМС, микросборками и навесными ЭРЭ, а также средствами электрического соединения, контроля параметров и элементами крепления.

Под *блоком* понимается конструктивно и функционально законченная сборочная единица, состоящая из ячеек, размещенных в его несущей части. При этом следует подчеркнуть, что блок, в большинстве случаев, не имеет самостоятельного эксплуатационного значения и является составной частью модуля более высокого конструктивного иерархического уровня.

*Стойка* является законченной конструкцией, предназначенной для объединения блоков или непосредственно типовых модулей первого уровня – ячеек.

Вид конструкции РЭС в значительной степени определяется количеством уровней иерархии типовых модулей, а также их геометрической компоновкой. Под геометрической *компоновкой* РЭС понимается выбор

формы, размеров, взаимного расположения типовых модулей и способов перемещения их относительно друг друга. С позиции взаимного расположения типовые модули могут повторяться в одном, двух и трех главных геометрических направлениях, что определяет так называемую *схему компоновки*.

### **1.2.2. Особенности модульной компоновки РЭС. Базовые несущие конструкции**

Модульная компоновка РЭС обеспечивает:

- стандартизацию и унификацию установочной и крепежной аппаратуры;
- возможность создания параметрических рядов изделий одного функционального назначения на основе принципа агрегатирования;
- сокращение сроков и затрат на проектирование РЭС;
- сокращение затрат времени и средств на техпроцесс изготовления, сборки и контроля изделий за счет осуществления указанных процессов по отношению к отдельным модулям по независимым производственным циклам;
- свободный доступ к составным элементам конструкции и, как следствие, высокую ремонтпригодность;
- возможность продления срока службы изделий без существенного морального износа за счет поэтапной модернизации отдельных конструктивных модулей.

Принцип агрегатирования применительно к РЭС формируется как построение функционально более сложных устройств из ограниченного набора более простых унифицированных изделий – модулей с использованием метода наращивания и функциональной стыковки.

Применение принципа агрегатирования при построении РЭС позволяет обеспечить рациональное сокращение и взаимозаменяемость конструктивных элементов, значительно упрощает и удешевляет процессы технического обслуживания и ремонта.

Основным условием агрегатирования является совместимость агрегатных средств – модулей. Концепция совместимости основана на последовательной унификации и стандартизации конструктивных и функциональных параметров модулей, включая средства их электрического и механического сопряжения.

Для осуществления свободного доступа к конструктивным элементам РЭС, требующим регулировок, ремонта и замены в процессе эксплуатации, используются различные способы перемещения типовых модулей

относительно друг друга: выдвижение, откидывание, раскрытие и др. При этом типовой модуль низшего уровня передвигается по направляющим модуля более высокого иерархического уровня. Связь указанных модулей с общей электрической схемой осуществляется при помощи удлиненного монтажного кабеля.

При откидывании, раскрытии и развороте перемещение происходит по шарнирным сочленениям. Связь между модулями осуществляется с помощью шлейфа проводов или гибкой ПП.

Важнейшей составной частью каждого типового модуля является так называемый *несущий элемент*, который обеспечивает механическую прочность и жесткость изделий РЭС, а также необходимый теплоотвод, удобство эксплуатации и ряд других требований.

Принципы модульного конструирования обеспечили возможность существенного сокращения номенклатуры несущих конструкций РЭС и перехода к их производству на специализированных предприятиях. Подобные конструкции были разработаны и получили название базовых несущих конструкций (БНК).

*Базовые несущие конструкции* выбираются, исходя из условий эксплуатации проектируемых РЭС, и при правильном их применении гарантируют не только соответствие РЭС данным условиям, но и технологичность в производстве.

Необходимо отметить, что использование БНК имеет большое значение как для разработчиков, так и для производителей. Первые избавляются от наименее творческого, рутинного и кропотливого труда по разработке деталей конструкции РЭС и получают возможность эффективного использования САПР. Вторые избавляются от широкой номенклатуры деталей и получают возможность эффективно использовать высокопроизводительное оборудование и существенно модернизировать производство.

Развитие БНК обеспечивает модульное наращивание конструкции РЭС, возможность создания напольных, настольных и встроенных конструкций, использование ПП различного размера, применение естественного или принудительного охлаждения, а также предусматривает размещение в стационарных помещениях, в контейнерах, на подвижных объектах и др. При создании крупных комплексов РЭС применение типовых разработок БНК обеспечивает конструктивное единство и удобство совместного размещения и эксплуатации аппаратуры, созданной различными предприятиями и организациями.

Крупномасштабное автоматизированное производство элементов БНК на специализированных заводах не только гарантирует качество, но и снижает материалоемкость за счет использования прогрессивных технологий.

### 1.2.3. Классификация РЭС

Конструкции РЭС различного назначения, устанавливаемые на различные объекты техники – так называемые носители, имеют особенности, вытекающие из специфики назначения и условий эксплуатации.

*Категории* характеризуют РЭС по продолжительности работы. Различают четыре категории РЭС:

- многократного;
- однократного;
- непрерывного;
- общего применения.

РЭС многократного применения способна выполнять свои функции несколько раз по мере необходимости, однократного – один раз за период эксплуатации. РЭС непрерывного применения предназначена для непрерывной работы всё время, за исключением плановых и вынужденных перерывов в работе. РЭС общего применения работает в смешанном режиме, как, например, бытовая РЭС.

*Классы* подразделяют РЭС по трём глобальным зонам использования:

- наземная РЭС (суша);
- морская (океан);
- бортовая (воздушное и космическое пространство).

Внутри классов различают специализированные *группы* в зависимости от объекта установки. Классообразующий признак группы – комплексный: назначение и тактика использования, условия совместимости с объектом, требования к составляющим надёжности, к защите от внешних воздействий и т.д.

### 1.2.4. Особенности проектирования наземной РЭС

Класс наземной РЭС включает в себя три основные группы:

- стационарной;
- для подвижных объектов;
- носимой РЭС и дополнительную группу бытовой РЭС.

При конструировании РЭС наземного класса возникает общая задача защиты от вибраций, ударов, пыли в условиях нормального атмосферного давления. *Стационарная* РЭС характеризуется:

1. особой продолжительностью эксплуатации и необходимостью постепенной модернизации;
2. работой в помещении с нормальными климатическими условиями;

3. отсутствием механических перегрузок во время работы;
4. транспортированием в амортизирующей упаковке;
5. хранением в складских условиях в климатических зонах изготовителя и потребителя;
6. высокой ремонтпригодностью при ремонте на месте установки.

Для стационарной РЭС имеются ограничения на габариты и массу одной стойки шкафа, определяемые удобством транспортирования, выгрузки, передвижения внутри помещения и т.п.

При конструировании РЭС вещательных станций необходимо предусматривать возможность их постепенной модернизации. Конструкция должна допускать модернизацию путём незначительного усовершенствования, замены отдельных блоков или введения приставок.

Разновидностью стационарной РЭС является подгруппа *переносной* РЭС, к которой относят лабораторную, медицинскую и иную РЭС. Объектом установки является поверхность стола, пола и т.п. Переносная РЭС всегда работает в комнатных условиях и не должна работать во время переноса с места на место. Перенос должен осуществляться, как правило, одним-двумя людьми.

Группа РЭС для *подвижных объектов* отличается тремя особенностями: повышенные требования к защите от вибраций и ударов; погрузка и разгрузка легко расчленяемых частей должна осуществляться силами двух человек; усиленное воздействие абразивной дорожной пыли.

К РЭС для подвижных объектов относят мобильные связные, радиолокационные и пеленгаторные станции, диспетчерские станции строительных, сельскохозяйственных и транспортных предприятий, включая железнодорожный транспорт, передвижные телевизионные студии, автомобильные приёмники и магнитолы и пр.

Общая масса комплекса РЭС для одной грузовой автомашины должна составлять примерно 2/3 её грузоподъёмности; остальная 1/3 идёт на запас для проезда по плохим дорогам, на ЗИП и бытовое оборудование операторов. Масса каждого моноблока не должна превышать 60 кг для осуществления демонтажа с автомашины в аварийных условиях.

РЭС, размещаемая в кузове автомашины (фургоне), имеет ограничение мощности рассеяния. Нормальная мощность рассеяния на единицу объёма фургона для естественного воздушного охлаждения составляет 0,5 кВт/м<sup>3</sup>; предельной является мощность 1 кВт/м<sup>3</sup>.

*Носимая* РЭС характеризуется размещением её на человеке и необходимостью защиты от случайных значительных ударов, неизбежных в полевых условиях. К носимой РЭС относят станции ближней связи, портативные радиопеленгаторы, некоторые виды медицинской аппаратуры.

Требование пространственной совместимости совпадает с эргономическими требованиями. Один человек может носить продолжительное время за плечами 10 кг, на ремне через плечо 3 кг, в кармане 0,7 кг. Важность миниатюризации в этом случае проявляется наиболее весомо. Кроме общих климатических требований, при работе носимой РЭС добавляются усложнённые условия в холодное время года, связанные с конденсацией росы в результате отпотевания при внесении с холодного воздуха в тёплое помещение. Конструкция носимой РЭС сильно зависит от габаритов и массы источников питания. Носимую РЭС для полевых условий выполняют в герметичном корпусе.

Бытовая РЭС отличается следующими тремя особенностями: повышенным эстетическим значением внешнего вида и акустических данных, приспособленностью к эксплуатации совершенно неподготовленным человеком, массовостью производства и определяющим значением стоимости. Современная бытовая РЭС разрабатывается по общим правилам соответствующей профессиональной группы.

### **1.2.5. Особенности проектирования морской РЭС**

Класс морской РЭС включает в себя три основные группы:

- судовую;
- корабельную;
- буйковую.

Морская РЭС отличается тремя особенностями:

1. комплексное воздействие климатических и механических факторов: 100 % влажность при повышенной температуре и солевом тумане в сочетании с непрерывной вибрацией от двигателей, ударными перегрузками и линейными ускорениями;
2. длительное автономное плавание с отрывом от ремонтных баз;
3. акустические, магнитные и радиационные воздействия.

Морская РЭС должна разрабатываться в тропическом исполнении, предусматривать коррозионную стойкость и плеснестойкость, водо- и брызгозащищённость. Прямое воздействие воды наблюдается во время штормов, в аварийных ситуациях, при противопожарном и противорадиоактивном самоорошении помещений. В ряде случаев морская РЭС предназначена для работы в погруженном в воду состоянии. Судовая и корабельная РЭС обладает следующими классообразующими признаками:

1. высоким уровнем типизации в целях упрощения материально-технического снабжения судов запасными узлами;

2. возможностью ремонта на месте установки при минимальном количестве персонала и ограниченных контрольно-измерительных и ремонтных средствах без захода на ремонтную базу;

3. необходимостью учёта ограниченности размеров люков и проходов на судне;

4. защищённостью от сильных высокочастотных и низкочастотных (работа гидроакустических станций) электромагнитных полей;

5. вибростойкостью (работа механизмов) и ударостойкостью при ударах волн и при стрельбах (для корабельной РЭС, имеющей ракетное, торпедное, артиллерийское вооружение), стойкостью к ускорениям, возникающим при качке.

*Судовая РЭС* устанавливается на пассажирские, грузовые суда (сухогрузные, наливные, промысловые, буксиры, ледоколы и др.).

*Корабельная РЭС* связи представляет собой размещенные на судах, надводных кораблях и подводных лодках радиотехнические средства кораблевождения, к которым относятся средства коррекции корабельных навигационных систем (радионавигационные и радиолокационные станции, радиомаяки), навигационные гидроакустические и телевизионные средства наблюдения (эхолоты, гидроакустические станции) и т.д. Разнообразие РЭС, сосредоточенной на судне или корабле, затрудняет снабжение запасными узлами. Особое внимание при конструировании судовой и корабельной РЭС должно уделяться стойкости при ударах. Радиолокационные установки, устройства передачи сигналов бедствия и т.д. должны сохранять работоспособность в случае повреждения самого судна или корабля в результате столкновения или других аварийных ситуаций.

Ограниченные габариты рубок, предназначенных для размещения РЭС, должны учитываться конструктором при обеспечении требуемой ремонтнопригодности на месте установки РЭС.

В благоприятных условиях находится связная РЭС, размещаемая в радиорубке. Согласно международным правилам в радиорубке должна быть вентиляция, обеспечивающая 20 обменов воздуха в час, и должна поддерживаться температура от 18 до 23 °С.

Автоматизированную РЭС устанавливают в необитаемых помещениях (отсеки, трюмы), где климатические условия тяжёлые. Часть специальной корабельной РЭС размещается на открытой палубе или за бортом ниже ватерлинии.

Обеспечение электромагнитной совместимости является одной из сложных задач, возникающих при размещении судовой и корабельной РЭС. Эффективно обеспечить совместимость можно только принятием мер при конструировании самого судна. Для соединений между стойками дол-

жен применяться экранированный кабель. Броня кабеля заземляется через небольшие интервалы по всей длине. Радиорубка должна представлять собой тщательно экранированное помещение.

*Буйковая* РЭС служит навигационным и другим целям и характеризуется:

- особой продолжительностью необслуживаемой эксплуатации;
- воздействием сильных ударов, связанных с волнением моря и с постановкой буя способом сбрасывания.

Температурные условия для буйковой РЭС считаются хорошими благодаря интенсивному теплоотводу от корпуса. К группе буйковой РЭС следует относить переносные радиостанции спасательных средств. Спасательная РЭС должна выполняться в лёгком герметичном корпусе, стойком к солёной воде, обладать дополнительной плавучестью и выдерживать без повреждения удар о воду при сбрасывании с высоты 10м.

### **1.2.6. Особенности проектирования бортовой РЭС**

Класс бортовой РЭС включает в себя группы:

- авиационной;
- космической;
- ракетной техники.

Бортовой называют РЭС, устанавливаемую на летательных объектах. Постоянная потребность в усложнении функций РЭС бортового класса ограничивается возможностями летательных объектов по массогабаритным показателям, поэтому уменьшение габаритов и массы бортовой РЭС принято считать первой задачей при конструировании. Вторая задача связана с необходимостью для бортовой РЭС, располагаемой вне гермоотсека, работать в условиях разреженной атмосферы. На большой высоте воздух разрежен (на высоте 26 км – до 2 кПа), что приводит к снижению его электрической прочности. На участках конструкции, имеющих острые углы и находящихся под высоким потенциалом, возможно коронирование. Герметизированная РЭС, расположенная вне гермоотсека, испытывает внутренние разрывающие усилия.

Помимо названных двух общих задач, стоящих при конструировании бортовой РЭС и являющихся классообразующими признаками, каждая группа имеет свои особенности.

Вертолётная и самолётная РЭС характеризуется относительной кратковременностью непрерывной работы, измеряемой часами, в остальное время РЭС находится под контролем персонала ремонтной базы: осуществляется периодический осмотр и контроль, перед каждым вылетом должна

проводиться предполётная проверка. Конструкция такой РЭС должна обеспечивать свободный доступ к внутренним частям для уменьшения времени на поиск неисправности. Чем меньше времени расходуется на предполётную проверку, тем больше экономический эффект от эксплуатации самолётов гражданского воздушного флота. Отсюда вытекает требование высокой контролепригодности.

Температура корпуса самолёта изменяется в широких пределах. Летом на аэродроме в южных районах корпус нагревается более чем до 50 °С на высоте 10 км. На сверхзвуковых самолётах при полёте в плотных слоях атмосферы корпус может нагреваться до 150 °С. В результате РЭС, расположенная вне гермоотсека, испытывает тепловые удары.

Вибрационные ударные и линейные перегрузки для конструкций РЭС самолётной группы значительны.

Во всех случаях задаётся диапазон частот вибрации. Нижние частоты возникают во время движения самолета по взлетно-посадочной полосе, а верхние связаны с работой двигателя. На взлёте и посадке образуются ударные перегрузки с хаотическим чередованием ударов. При любом изменении скорости возникают линейные перегрузки.

В процессе полёта лётчик непрерывно поддерживает радиосвязь с диспетчерами. Он должен быть проинформирован о зонах грозовой облачности, местонахождении других самолётов и т.д. Весь посадочный манёвр осуществляется с помощью радиотехнических систем посадки. Результаты работы РЭС используются лётчиком или штурманом, для которых эти результаты – не цель действий, а только средство для выполнения другой задачи. Следовательно, РЭС должна работать автоматически, самостоятельно обрабатывать результаты и выдавать их в виде, удобном для быстрого восприятия: отклонение стрелки влево-вправо, зажигание сигнала, совмещение визиров.

Разрабатывая конструкцию самолётной РЭС, нужно иметь в виду, что заняты не только зрение, слух и руки лётчика, но и ограничено место, где могут быть установлены органы управления и средства отображения информации.

Блоки самолётной РЭС приходится выносить в те места самолёта, где есть Удобный доступ для смены и осмотра. Поэтому характерной особенностью являются коммуникации дистанционного управления. На самолётах и вертолётах отведены радиоотсеки, где РЭС komponуется в виде стоек или на монтажных рамах.

К космической и ракетной РЭС, помимо общих требований к бортовому классу, предъявляют дополнительные требования:

1. особой ограниченности массы и объёма в связи с необходимостью иметь минимальную стартовую массу ракеты-носителя;
2. чрезвычайно высокой безотказности;
3. высокой ремонтпригодности в предстартовый период;
4. совместного действия вибрационных и линейных нагрузок во время старта.

Следует особо отметить требования к безотказности во время полёта и к ремонтпригодности в предстартовый период. Практически любые затраты на повышение этих показателей будут малы по сравнению с общей стоимостью запуска космического корабля. Весь успех космической экспедиции, в конечном счете, определяется безотказностью работы РЭС. Поэтому функциональные узлы многих систем должны иметь резервирование. Резервирование включается как автоматически, так и экипажем. Для определения вышедшего из строя блока космонавты наблюдают за бортовыми индикаторами и принимают решение о переключении на резервный блок. Переключение должно проводиться одним движением. Пульт управления в кабине космического корабля напоминает самолётный, но проектируется с учётом состояния невесомости оператора.

РЭС искусственных спутников Земли относится к группе космической, но является необслуживаемой. Эта аппаратура характеризуется:

1. особой продолжительностью эксплуатации без обслуживания (годы);
2. работой в условиях атмосферы с постоянным газовым составом низкой влажности или в вакууме;
3. циклическим изменением температуры;
4. отсутствием механических нагрузок во время работы;
5. опасностью воздействия радиации.

Спутник представляет собой контейнер, заполненный РЭС и физическими приборами, которые служат датчиками для РЭС. Источником питания являются химические элементы, работающие совместно с солнечными батареями, установленными на раскрывающихся створках большой площади. Дополнительные отличительные черты ракетной РЭС:

1. разовость использования;
2. необходимость в особой кратковременности предстартовой проверки и высокой ремонтпригодности в предстартовых условиях;
3. работа в условиях быстрого возрастания окружающей температуры на обшивке ракеты – до нескольких сотен градусов;
4. длительная сохраняемость при многолетнем хранении;
5. большие ударные нагрузки.

Для того чтобы измерять режим и производить подстройку непосредственно перед пуском, в конструкции ракетной РЭС должно быть пре-

дусмотрено дистанционное управление с выводом контрольных точек на корпус ракеты в места, удобные для доступа. Для полного использования объёма отсека, выделяемого на малых ракетах, РЭС имеет вид цилиндра.

### 1.2.7. Конструкционные материалы

В производстве РЭС широко используются следующие материалы: металлы и сплавы; простые и сложные полупроводники; диэлектрики; магнитные материалы. Они применяются при изготовлении несущих конструкций, видовых, защитных и других деталей и узлов.

Из *металлических* материалов в производстве РЭС широко используются железо, медь, алюминий, титан, магний, молибден, никель и их сплавы.

*Железо* служит основой для изготовления железоуглеродистых сплавов – стали и чугуна. В стали содержится от 0,08 до 2,14 % углерода, в чугунах – от 2,14 до 6,67 %. *Стали* подразделяются на: углеродистые, легированные и с особыми физико-химическими свойствами. Из *углеродистых* при изготовлении РЭС применяются качественные конструкционные и инструментальные стали. *Конструкционные* маркируются по химическому составу цифрами, которые обозначают содержание углерода в сотых долях процента. Например, сталь 08 (0,08 % С), сталь 10 (0,1 % С). Они обладают способностью к глубокой вытяжке, хорошо обрабатываются резанием и свариваются. Их применяют для изготовления крепежных деталей, деталей несущих конструкций, корпусов полупроводниковых приборов и т.д.

С повышением содержания углерода в стали ее твердость увеличивается, ухудшается пластичность. *Углеродистые инструментальные* стали маркируются буквой У, после которой цифрой указывается содержание углерода в десятых долях процента. Например, сталь **У12** содержит 1,2 % С. Эти стали обладают высокой износостойкостью и используются для изготовления режущего инструмента.

С целью изменения свойств стали ее легируют, т.е. добавляют соответствующие элементы. *Легированные стали* маркируются по своему составу. Для этого используется сочетание букв и цифр, причем буквы указывают на соответствующий легирующий элемент, а цифры после букв – на содержание этого элемента в процентах. Буква А в конце маркировки показывает, что сталь очищена от вредных примесей серы и фосфора (до 0,025 % каждого). Например, сталь 12ХНЗА содержит 0,12 % С, 1 % Cr, 3 % Ni, < 0,025 % S и < 0,025 % P. Сталь 12ХНЗА обычно применяется для изготовления зубчатых колес и муфт сцепления. Для изготовления пружин

и пружинящих деталей ответственного назначения используются стали марок 55С2А, 50ХФА, 60С2ХА и некоторые другие. В особых случаях, например для деталей вакуумных конструкций, целесообразно применение нержавеющей стали марки Х18Н9Т.

Из сталей с особыми физическими и химическими свойствами широко применяются *нержавеющие, пружинные и жаростойкие*.

*Медь* обладает высокой электропроводностью, теплопроводностью, хорошо обрабатывается давлением как в горячем, так и в холодном состоянии. Примеси резко снижают ее электропроводность. Медь марки М1 широко используется в производстве проводов.

В конструкциях РЭС широко применяют медно-цинковые сплавы с содержанием цинка до 45 % – *латуни*. Они маркируются буквой Л и двумя цифрами, которые указывают содержание цинка в процентах. Латуни хорошо обрабатываются давлением и резанием. Из латуней изготавливают корпуса, втулки, крышки, основания и другие детали, не требующие высокой прочности. Марки латуней: ЛС-59-1; Л63.

Сплавы меди с оловом и другими элементами называют *бронзами*. Их маркируют буквами БР и цифрами, указывающими среднее содержание легирующих элементов в процентах. Например, БР ОЦ4-3 – бронза оловянно-цинковая, содержит 4 % олова и 3 % цинка, остальное – медь. Бронзы обладают хорошими механическими, антифрикционными и литейными свойствами. Особое значение имеет бериллиевая бронза БРБ2. Она используется для изготовления пружин, мембран, деталей электроизмерительных приборов, растяжек пружинных переключателей и других ответственных деталей.

*Алюминий* имеет малую плотность, невысокое удельное сопротивление, хорошо обрабатывается давлением в холодном и горячем состоянии. Плотная пленка диоксида алюминия защищает его от коррозии.

Из сплавов известны деформируемые и литейные алюминиевые сплавы. К деформируемым относятся сплавы А1-Си, А1-Мп; А1-Мг; А1-Си-Мг и др.

Наибольшее распространение нашли *дюралюмины* и высокопрочные алюминиевые сплавы. Дюралюмины маркируются буквой Д и условным номером сплава, например, Д1; Д6; Д16 и т. д. Высокопрочные сплавы маркируются буквой В и условным номером: В95, В93 и т. д. Дюралюмины используются для изготовления обшивки корпусов, силовых каркасов и других деталей, работающих при переменных нагрузках.

К литейным алюминиевым сплавам относятся *силумины* – сплавы алюминия с кремнием (5...14 % Si). Они маркируются буквами АЛ (алюминиевый литейный) и цифрами, указывающими порядковый номер сплава.

ва (АЛЗ, АЛ5 и т. д.). Такие сплавы применяются для изготовления корпусов, крышек, направляющих, деталей сложной конфигурации.

Из полупроводниковых материалов в технологии РЭС при изготовлении элементной базы применяют элементарные полупроводники (кремний, германий, арсенид галлия) и полупроводниковые неорганические соединения.

*Кремний* имеет различную проводимость в зависимости от степени легирования от  $10^{-2}$  до  $10^2(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$ . Благодаря большой ширине запрещенной зоны кремний высокой степени очистки сохраняет свои свойства при нагреве до 398 К. Его применяют для изготовления интегральных микросхем (ИМС), транзисторов, диодов, мощных выпрямителей, солнечных батарей и других приборов.

В *германии* особенно ярко проявляется влияние примесей, поэтому при изготовлении приборов используют германий весьма высокой чистоты. Выпускаемый легированный германий может иметь проводимость от  $10^{-2}$  до  $10(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$ . Допустимая температура эксплуатации не превышает 348 К. Германий используют для изготовления диодов, мощных выпрямителей, триодов, датчиков ЭДС, Холла, тензометров и других приборов.

Из сложных неорганических соединений широкое применение находят полупроводники АIII – BV и АII – BVI. Полупроводники первого вида образуются соединением элементов III группы – алюминия, галлия, индия с элементами V группы – фосфором, мышьяком и сурьмой. Электронная проводимость достигается введением элементов VI группы – селен, теллур, дырочный полупроводник получают добавлением элементов II группы – цинк, кадмий.

К группе полупроводников АII – BVI относятся соединения элементов II группы (цинк, кадмий, ртуть и др.) с элементами VI группы (сера, селен и теллур). Эти материалы обладают высокой чувствительностью к инфракрасному и видимому свету, ионизирующему излучению, позволяют получать низкую проводимость – до  $10^{-13}(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$ , просты и экономичны в изготовлении.

Полупроводниковые материалы используются для изготовления диодов, транзисторов, пластин полупроводниковых ИМС, датчиков ЭДС, Холла (германий, кремний), варисторов, нагревателей электрических печей (карбид кремния SiC), фоторезисторов, фотодиодов (антимонид индия InSb, арсенид галлия GaAs), полевых транзисторов (теллурид кадмия CdTe).

При производстве несущих конструкций РЭС диэлектрики используются как изоляторы, а также при изготовлении видовых и защитных де-

талей. Из диэлектрических материалов широко применяются пластмассы, стекла, ситаллы и керамика.

*Пластмассы* – это искусственные материалы, получаемые на основе природных и синтетических высокомолекулярных органических соединений – полимеров. Такие соединения содержат сотни и тысячи атомов в одной молекуле. Пластмассы разделяют на простые и сложные. *Простые пластмассы* (полиэтилен, плексиглас, полистирол и т.д.) представляют собой чистые термопластичные полимеры. *Сложные* (композиционные) пластмассы состоят из полимера и ряда специальных добавок, благодаря которым повышается прочность, жесткость, термостойкость, улучшаются другие свойства пластмасс. В качестве наполнителей применяют минеральные (оксид цинка, диоксид титана, слюда, мел) и органические (древесная мука, бумага, хлопковые ткани) материалы. В зависимости от чувствительности пластмассы к нагреву различают термопластичные и термореактивные пластмассы. Первые выдерживают неоднократный нагрев и формообразование, вторые после охлаждения застывают необратимо и последующей формовке не подлежат.

В технологии РЭС широко используются пластмассы: полиэтилен (пленочная изоляция), фторопласт-4 (прокладки, клапаны, химически стойкие детали, трубы, шланги), полистирол (видовые детали, каркасы катушек, колпачки и т.п.), полиамиды (пленки, втулки, шестерни), полиуретаны (электрорадиоэлементы, работающие длительное время при высокой влажности и температуре до 373...423 К) и др.

*Стеклами* называют аморфные вещества, получаемые путем переохлаждения жидких растворов кислородсодержащих соединений и их смесей. Стекло в жидком состоянии представляет собой сложный расплав, имеющий высокую вязкость и состоящий из ионов и химических соединений кислотных и основных оксидов. Главными стеклообразующими оксидами являются  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_5$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , оксиды германия и мышьяка. Стекла обладают хорошими электроизоляционными свойствами.

*Ситаллы* – искусственные материалы микрокристаллического строения, получаемые из стекол путем направленной инициированной кристаллизации. Ситаллы, изготовленные из фоточувствительных стекол, называют фотоситаллами. В ситаллах сочетаются такие свойства, как высокая механическая прочность, твердость, термическая и химическая стойкость, хорошие электрические характеристики. В технологии РЭС применяют ситаллы: установочные (для изготовления микромодулей, прокладок, оснований и других элементов), конденсаторные (в качестве межслоевого диэлектрика) и вакуумные (для изготовления подложек гибридных микросхем и микросборок).

*Керамику* получают спеканием неорганических солей с минералами и оксидами металлов. Керамические материалы термостойки, характеризуются высокой механической прочностью, хорошими диэлектрическими свойствами, стабильны и надёжны в эксплуатации. Достоинством керамики является то, что она дает возможность получения заданных параметров материала путем изменения его исходного состава. Основными составляющими керамики являются такие оксиды, как  $Al_2O_3$ ,  $MnO$ ,  $Na_2O$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $MgO$  и др.

К *магнитным* материалам, применяемым для изготовления РЭС, относят металлические магнитные материалы, магнитодиэлектрики и ферриты. Из *металлических* магнитных материалов применяют различные сорта электротехнической стали, пермаллой. Электротехническая сталь выпускается в виде листов толщиной 0,35...0,50 мм, а некоторые ее сорта, например, Э310; Э320; Э330 – в виде лент толщиной до 0,003 мм. Пермаллой (сплав железа и никеля, например, 50НП – пермаллой с содержанием никеля 50 %) имеет значительно большую магнитную проницаемость, чем сталь, поэтому магнитопроводы из них имеют меньшие размеры и используются для изготовления трансформаторов переносной и малогабаритной аппаратуры.

Металлические магнитные материалы обладают низким удельным сопротивлением ( $10^{-5} \dots 10^{-4}$  Ом·м) и не могут применяться для работы на высоких частотах из-за вихревых токов, вызывающих большие потери.

Для высокочастотной аппаратуры используются магнитопроводы из магнитодиэлектриков, у которых удельное сопротивление гораздо выше (от  $10^{-2}$  до  $10^2$  Ом·см). *Магнитодиэлектрик* представляет собой спрессованный порошок магнитного материала, частицы которого склеены изолирующим веществом. В качестве магнитного материала используют порошки карбонильного железа с диаметром частиц от 2 до 20 мкм, альсифер (сплав железа с кремнием и алюминием). Магнитодиэлектрики обладают небольшой магнитной проницаемостью.

Наименьшими потерями на больших частотах и высокой магнитной проницаемостью обладают соединения оксидов железа с оксидами других металлов (Ni, Zn, Mn, Cu, Cd), т. е. соединения типа  $MO \cdot Fe_2O_3$ , где М – символ двухвалентного металла. Такие соединения названы ферритами. *Ферриты* имеют мелкозернистую кристаллическую структуру, механические свойства их близки к свойствам керамики.

Для изготовления элементов вычислительной техники используют магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса. К ним относятся пермаллой 50НП (50 % Ni), 65НП (65 % Ni), железоникелевокобальтовые сплавы, например, сплав 34НКМП (40 % Ni, 30 % Co).

## Раздел 2

### ВЗАМИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ И ДОПУСКИ

#### Тема 2.1

#### КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМЕ ДОПУСКОВ И ПОСАДОК

##### 2.1.1. Основные понятия и определения

Установление допусков на размеры деталей, посадок, параметров шероховатости поверхности должны осуществляться на основании оценки технико-экономической эффективности процесса изготовления изделия.

Единая система допусков и посадок (ЕСДП СЭВ) регламентирует допуски на гладкие детали и посадки, образуемые при соединении этих деталей. Центральное место в этой системе занимают стандарты: ГОСТ 25346-82 (СТ СЭВ 145-75) «ЕСДП. Общие положения, ряды допусков и основных отклонений» и ГОСТ 25347-82 (СТ СЭВ 144-75) «ЕСДП. Поля допусков и рекомендуемые посадки». Этими стандартами определены предпочтительные поля допусков и рекомендуемые посадки для размеров менее 1 мм и от 1 до 3150 мм. Стандарты разработаны с учетом международной системы допусков и посадок.

Размер, измеренный с допустимой погрешностью, называется **действительным** размером. Этот размер должен находиться между предельными размерами деталей. Различают (рис. 2.1, а, б) наибольший предельный размер для отверстий  $d_{EB}$ , наибольший предельный размер для вала  $d_{eB}$ , наименьший предельный размер для отверстия  $d_{EM}$  и наименьший предельный размер для вала  $d_{eM}$ .

**Номинальный** размер  $d_n$  – это размер, относительно которого определяются предельные размеры и который является также началом отсчета отклонений.

**Верхним предельным отклонением** ( $ES, es$ ) называется алгебраическая разность между наибольшими предельными и номинальными размерами.

**Нижним предельным отклонением** ( $EI, ei$ ) называется алгебраическая разность между наименьшими предельным и номинальным размерами.

Существующие на практике отклонения отверстия и вала (рис. 2.1, а) симметричны относительно нулевой линии 0-0 (рис. 2.1, в). Однако при таком расположении отклонений расчет допусков осуществить нельзя, ибо

начало координат (точка  $O_1$ ) строго в пространстве не определено. В этой связи принято условное несимметричное расположение отклонений (рис. 2.1, б), при котором начало координат (точка  $O_2$ ) находится в нижней полуплоскости (сечение А-А).

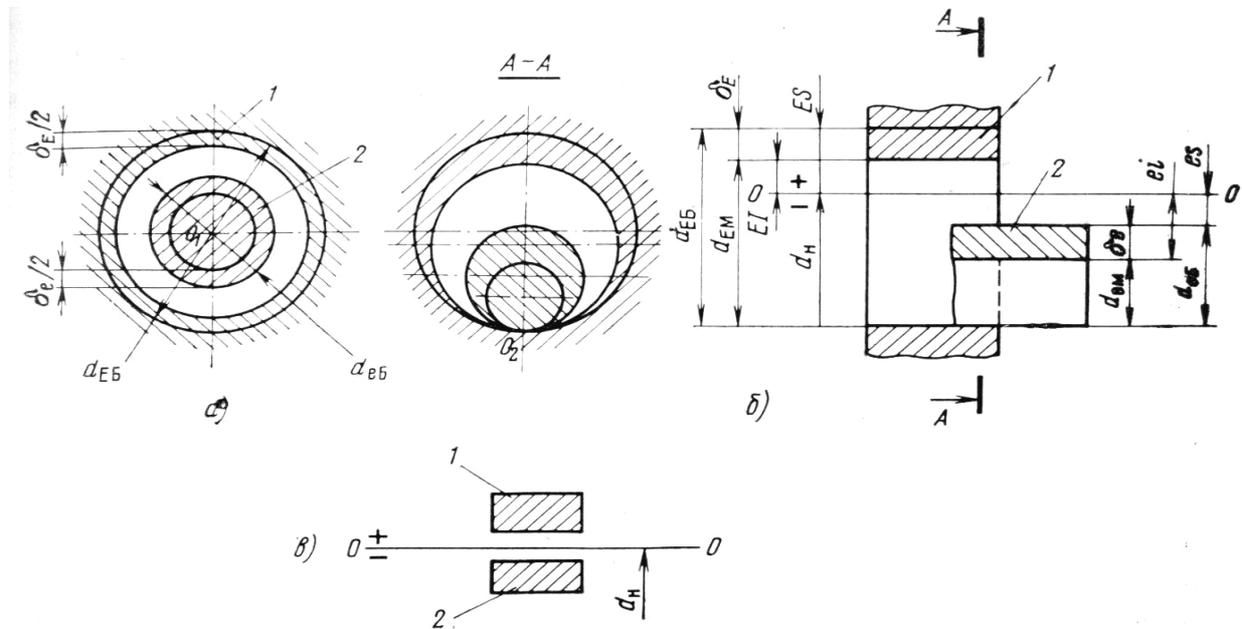


Рис. 2.1. К определению допусков:

*a* – действительное расположение полей допусков в соединении, *б* – условное расположение полей допусков в соединении, *в* – упрощенная схема: 1 – поле допуска отверстия, 2 – поле допуска вала

**Действительным отклонением** называется алгебраическая разность между действительным и номинальным размерами.

**Допуск размера  $\delta_E$  или  $\delta_e$**  – это разность между наибольшим и наименьшим предельными размерами или абсолютная разность между верхним и нижним отклонениями, т.е. для отверстия и вала соответственно

$$\delta_E = \delta_{EB} - \delta_{EM}; \delta_e = \delta_{eB} - \delta_{eM}.$$

**Посадкой** называется характер сопряжения деталей, определяемый величиной получающихся в нем зазоров или натягов.

Если размер отверстия больше размера вала, то в соединении будет зазор *S* (посадка с зазором). Если же размер вала больше размера отверстия, то в соединении будет натяг *N* (посадка с натягом).

**Допуском посадки** называется разность между наибольшим и наименьшим допустимыми зазорами (*TS*) или наибольшим и наименьшим допустимыми натягами (*TN*), т.е.

$$TS = S_B - S_M; TN = N_B - N_M.$$

В переходных посадках допуск посадки определяется суммой наибольшего натяга и наибольшего зазоров, взятых по абсолютной величине

$$TS(TN) = |TN| + |TS|.$$

### 2.1.2. Краткие сведения о системе допусков и посадок

В ЕСДП имеются две равноправные системы – система отверстия (основное отверстие обозначается буквой H) и система вала (основной вал обозначается буквой h).

**Посадки в системе отверстия**, т.е. различные зазоры и натяги, осуществляются за счет изменения предельных размеров вала. Нижнее отклонение основного отверстия равно нулю.

**Посадки в системе вала** осуществляются за счет изменения предельных размеров отверстия. Верхнее отклонение основного вала равно нулю.

Несмотря на то, что системы отверстия и вала равноправны, *более экономично применение посадок в системе отверстия*. Систему вала выгодно применять для деталей типа тяг, осей, валиков, которые изготавливаются из калиброванных прутков без механической обработки их поверхности.

При выборе системы посадок следует учитывать характер соединения. Например, вал для соединения с внутренним кольцом подшипника качения должен всегда изготавливаться по системе отверстия, а гнездо в корпусе для посадки наружного кольца – по системе вала.

**Расположение** поля допуска относительно нулевой линии характеризуется *числовым значением* и *знаком* основного отклонения – той границы поля допуска, которая ближе к нулевой линии. Всего для отверстий и валов установлено по 27 вариантов основных отклонений или уровней (рис. 2.2).

Одноименные основные отклонения отверстий, как правило, имеют те же числовые значения, что и отклонения валов, но противоположные знаки. Валы  $j$  и  $j_s$  и отверстия  $J$  и  $J_s$  основных отклонений не имеют. Для них поле допуска располагается симметрично относительно нулевой линии (оба предельные отклонения (равны  $\pm IT/2$ ). Отклонения  $a - h$  и  $A - H$  предназначены для образования полей допусков в посадках с зазорами,  $(j - n)$  и  $(J - N)$  – в переходных посадках,  $(p - zc)$  и  $(P - ZC)$  – в посадках с натягом.

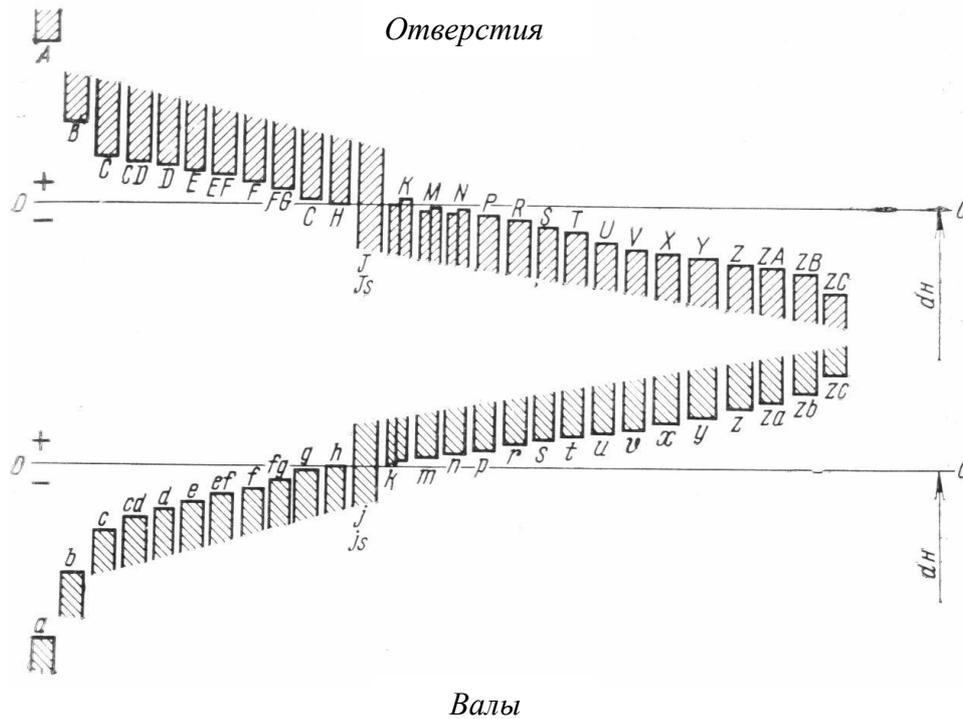


Рис. 2.2. Расположение полей допусков для данного интервала размеров (основные отклонения)

Экспериментальное исследование точности обработки цилиндрических деталей показало, что при неизменности технологической системы станок – приспособление – инструмент – деталь (СПИД) погрешность изготовления  $\Delta$  (диапазон рассеивания размеров) зависит от диаметра  $d$  детали и определяется по формуле

$$\Delta = C\sqrt[3]{d}, \quad (2.1)$$

где  $C$  – коэффициент, зависящий от вида обработки; при обработке шлифованием валов  $C = 0,005$ , отверстий –  $0,008$ .

**Единица допуска.** Величина, выражающая зависимость допуска от номинального размера и принятая в качестве базы для определения стандартных допусков, называется **единицей допуска**.

Зависимость (2.1) используется при расчете единицы допуска  $i$ : для размеров 1 – 500 мм

$$i = 0,45\sqrt[3]{d_{cp}} + 0,001d_{cp} \text{ [мкм]}, \quad (2.2)$$

где  $d_{cp}$  – среднее геометрическое крайних номинальных размеров интервала; для интервала до 3 мм принимается  $d_{cp} = \sqrt{3}$ .

**Квалитеты точности.** Шкалу точностей образуют 19 рядов допусков, называемых **квалитетами**. Каждый квалитет обозначается порядковым номером, возрастающим с увеличением поля допуска: 01; 0; 1; 2; 3; ...; 17.

Условно **допуск по качеству обозначают** буквами и номером качества: например, *IT6* – допуск по 6 качеству. Переход от одного качества к другому, более грубому, соответствует увеличению поля допуска примерно на 60 %.

**При данном номере качества и номинальном размере допуск имеет только одно значение, единое для отверстия и вала и не зависящее от типа посадки.**

*Величина допуска* для любого качества определяется по формуле

$$IT = Ki, \quad (2.3)$$

где  $K$  – коэффициент точности, равный числу единиц допуска  $i$ , зависящий от качества и не зависящий от номинального размера (справочная величина).

В процессе проектирования используются три метода выбора допусков и посадок на детали и сборочные единицы:

1. *Метод прецедентов* заключается в том, что в чертежах на детали различных изделий, находящихся в эксплуатации, находят однотипные детали и по ним определяют допуски на размеры проектируемой детали.

2. *Метод подобия*. Используя классификационные материалы, устанавливают аналог проектируемой детали и по нему определяют допуски и посадки на проектируемое изделие.

Общим недостатком методов прецедентов и подобия являются возможность применения неправильно установленных допусков и посадок и сложность определения признаков для выбора аналогов.

3. *Расчетный метод*. Для повышения точности и надежности деталей и их миниатюризации целесообразно при проектировании максимально приблизить размеры деталей к расчетным значениям. Однако при этом могут возникнуть трудности технологического и метрологического характера. Обработка детали по более точному допуску требует сложного оборудования и дорогого инструмента, и высокой квалификации рабочего. Таким образом, требования к точности и стоимости находятся в противоречии (рис. 2.3), которое можно разрешить только технико-экономическими расчетами.

Предельные отклонения размеров могут быть указаны на чертежах одним из следующих способов:

- условными обозначениями полей допусков;
- числовыми значениями предельных отклонений;
- условными обозначениями полей допусков с указанием справа в скобках числовых значений предельных отклонений.

Варианты обозначений на чертежах предельных отклонений линейных размеров указаны на рис. 2.4.

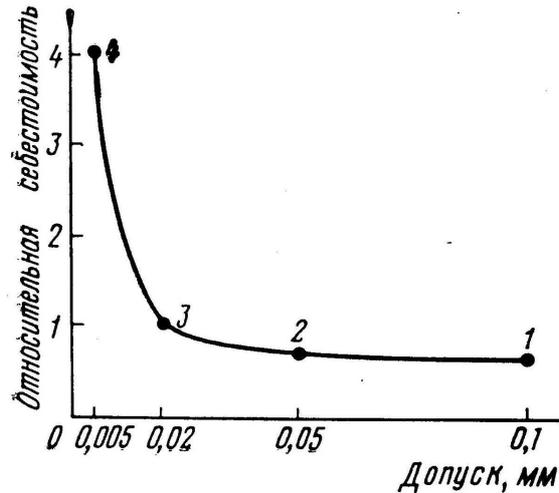


Рис. 2.3. Зависимость между стоимостью и точностью обработки:  
 1 – холодное волочение, 2 – обтачивание на токарном станке,  
 3 – обтачивание и шлифование, 4 – обтачивание, шлифование и притирка

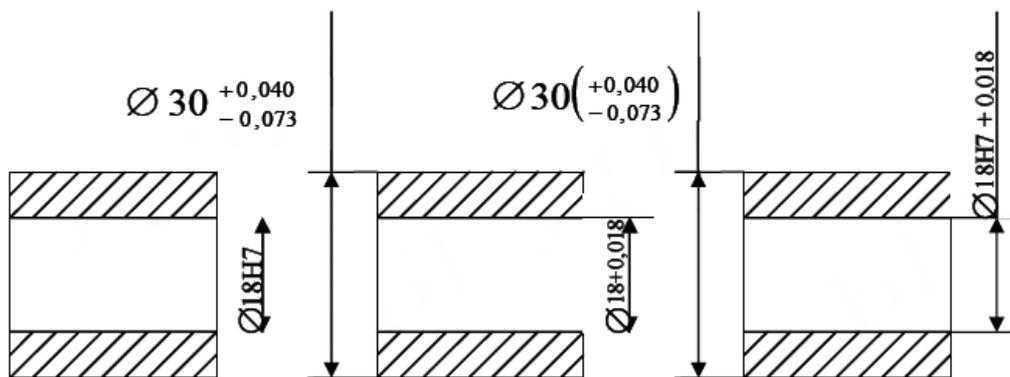


Рис. 2.4. Варианты обозначений на чертежах предельных отклонений линейных размеров

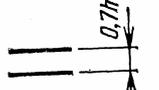
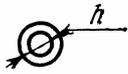
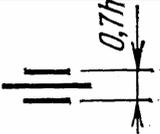
Множественно повторяющиеся на чертежах предельные отклонения относительно низкой точности (от 12-го качества и грубее) после номинальных размеров допускается не наносить, а оговорить общей записью в технических требованиях в одном из вариантов: «Неуказанные предельные отклонения размеров: отверстий  $H14$ , валов  $h14$ , остальные  $\pm IT14/2$ » или «Неуказанные предельные отклонения размеров: диаметров  $H12$ ,  $h12$ , остальных  $\pm IT12/2$ ». Обозначение  $\pm IT/2$  рекомендуется для симметричных отклонений потому, что оно распространяется на размеры различных элементов, которые не относятся к валам и отверстиям (расстояние между осями, глубина выступов и т.п.).

### 2.1.3. Отклонения формы и расположения поверхностей

В результате производственных погрешностей, обусловленных неточностью технологической системы, практически неизбежных при механической и других видах обработки, нельзя выполнить абсолютно точно геометрические размеры, форму и взаимное расположение поверхностей деталей. В некоторых случаях погрешности формы деталей могут привести к потере точности и снижению надежности сборочных единиц и изделия в целом. В ЕСКД установлены допуски на форму и взаимное расположение поверхностей. Основные из них приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Условные обозначения допусков формы и расположения поверхностей на чертежах

Группа допусков	Вид допуска	Знак
Допуски формы	Допуск прямолинейности	—
	Допуск плоскостности	
	Допуск цилиндричности	
	Допуск круглости	
	Допуск профиля продольного сечения	
Допуски расположения	Допуск параллельности	
	Допуск перпендикулярности	
	Допуск наклона	
	Допуск соосности	
	Допуск симметричности	
	Позиционный допуск	
	Допуск пересечения осей	

## Тема 2.2 ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ ПО ШЕРОХОВАТОСТИ

### 2.2.1. Параметры шероховатости

Шероховатость характеризует качество поверхности детали. Она оказывает влияние на эксплуатационные показатели изделия и устанавливается исходя из функционального назначения поверхности.

Шероховатость поверхности – это совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенная на базовой длине  $l$  (рис. 2.5).

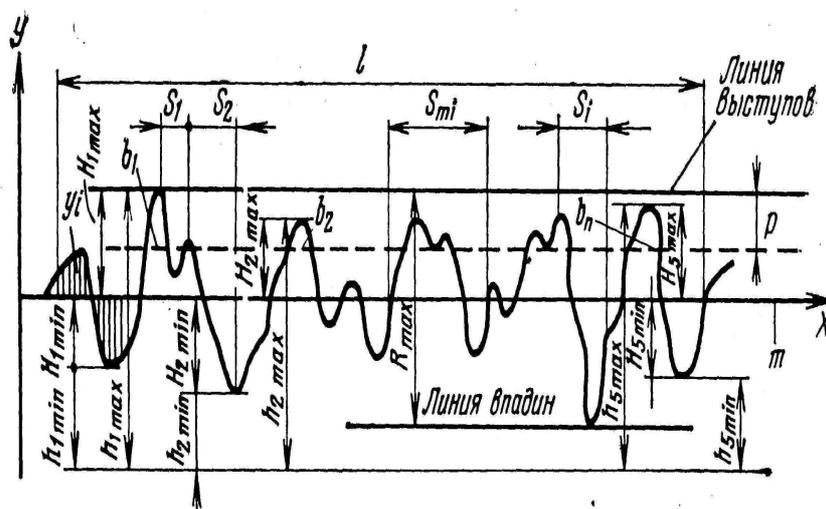


Рис. 2.5. Профиль поверхности и параметры шероховатости

ГОСТ 2789-73 и СТ СЭВ 638-77 определяют ряды чисел, рекомендуемых для выбора значений параметров  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rmax$ ,  $S_{max}$ ,  $S$  и  $t_p$ , которые указываются на чертежах.

Параметры  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rmax$  характеризуют высотные свойства неровностей профиля в пределах базовой длины:  $Ra$  – среднее арифметическое отклонение профиля,  $Rz$  – высоту неровностей профиля по десяти точкам,  $Rmax$  – наибольшую высоту неровностей профиля. Параметр  $Ra$  предпочтительный. Параметры  $Rz$ ,  $Rmax$  менее информативны, их следует назначать в тех случаях, когда оценить шероховатость по параметру  $Ra$  невозможно.

Предпочтительные числовые значения параметров  $Ra$ ,  $Rz$  и  $Rmax$  выбирают из ряда: 400; 200; 100; 50; 25; 12,5; 6,3; 3,2; 1,6; 0,8; 0,4; 0,2; 0,1; 0,05; 0,036; 0,012 мкм.

Параметры  $S$  и  $S_{max}$  характеризуют свойства неровностей в направлении длины профиля в пределах его базовой длины, а именно:  $S$  – средний шаг местных выступов профиля и  $S_{max}$  – средний шаг неровностей профиля;  $H_{i\ max}$  и  $H_{i\ min}$  – расстояния между вершинами выступов и средней линией;  $h_{i\ max}$  и  $h_{i\ min}$  – расстояния между вершинами выступов и произвольной линией, расположенной параллельно средней линии.

Параметр  $t_p$  – относительная опорная длина профиля – содержит информацию о форме неровностей профиля. Определяется параметр  $t_p$  по формуле

$$t_p = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{l}, \quad (2.3)$$

где  $\sum_{i=1}^n b_i$  – опорная длина профиля, т.е. сумма длин отрезков, отсекаемых на заданном уровне  $p$  в материале профиля линией, эквидистантной средней линии в пределах базовой длины  $l$ .

Базой для отсчета отклонений профиля является **средняя линия профиля**  $m$  – линия, имеющая форму номинального профиля и проведенная так, что в пределах базовой длины среднее квадратическое отклонение профиля до этой линии минимально.

Износостойкость, контактная жесткость, надежность посадок с гарантированным натягом будут зависеть от значений параметра  $t_p$ . Следует учитывать, что с увеличением  $t_p$  требуются более трудоемкие процессы обработки, например при  $t_p = 25\ %$  применяется чистовое точение, а при  $t_p = 40\ %$  – хонингование.

В табл. 2.2 приведены эксплуатационные свойства поверхностей, зависящие от шероховатости, и параметры, с помощью которых обеспечиваются показатели этих поверхностей.

Обозначение требований к шероховатости поверхности и правила их нанесения в технической документации определены ГОСТ 2.309-79. Каждый вид обработки деталей характеризуется экономической точностью и шероховатостью поверхности.

Рекомендации по выбору параметра шероховатости  $Ra$  для свободных размеров деталей из металлов даны в табл. 2.3.

Шероховатость поверхности обозначается на чертежах специальными знаками (рис. 2.6).

Таблица 2.2

**Зависимость параметров шероховатости поверхности  
от ее эксплуатационных свойств**

Эксплуатационные свойства поверхности	Параметры шероховатости поверхности и характеристики
Сопротивление износу трущихся поверхностей	$Ra(Rz), t_p$ (направление неровностей)
Трение (скольжения и качения)	$Ra(Rz), t_p$ (направление неровностей)
Виброустойчивость	$Ra(Rz), S_M, S$ (направление неровностей)
Контактная жесткость	$Ra(Rz), t_p$
Прочность соединений	$Ra(Rz)$
Прочность конструкций при циклических нагрузках	$R_{max}, S_M, S$ (направление неровностей)
Герметичность соединений	$A_{max}$
Сопротивление в волноводах	$Ra, S_M, S$

Таблица 2.3

**Рекомендации по выбору параметров шероховатости поверхности  
для деталей из металла со свободными размерами**

Параметр шероховатости поверхности $R_a$ , мкм	Наименование детали или поверхности
400	Грубо обработанные поверхности под окраску
100	Грубые, не соприкасающиеся друг с другом поверхности угольников, боковых и задних стенок шасси, шкафов и т.п. Обработанные поверхности литых деталей под окраску со шпатлевкой. Отверстия 14 качества на проход винтов, болтов, заклепок и т.п.
50	Поверхности кронштейнов, муфт, втулок, колец, дисков, фланцев, зубчатых колес и других деталей, не соприкасающихся с соседними деталями и не используемые в качестве технологических баз

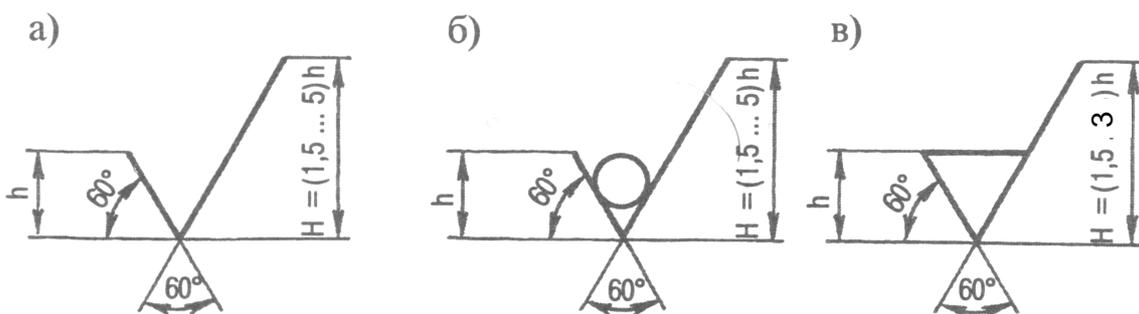
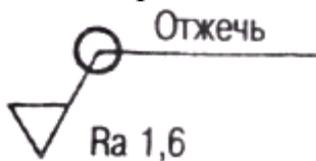


Рис. 2.6. Условное обозначение шероховатости поверхности:

*a* – поверхность, не обрабатываемая по данному чертежу, *б* – поверхности, вид обработки которых конструктором не устанавливается, *в* – поверхности, вид обработки которых определен конкретно

Поверхности, вид обработки которых является единственным, обозначаются знаком



начаются знаком

Значение параметра шероховатости указывают в обозначении шероховатости (рис. 2.7).

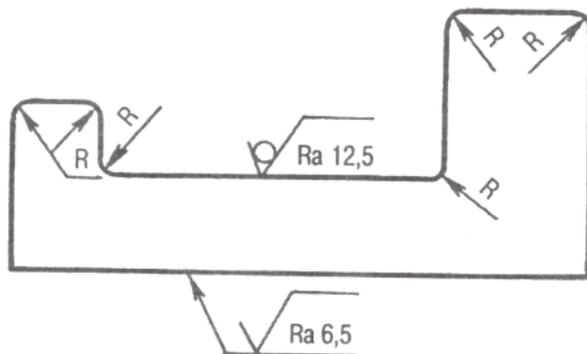


Рис. 2.7. Пример обозначения шероховатости поверхности на чертеже

### 2.2.2. Технологические методы получения тонкообработанных поверхностей

Точность и шероховатость обработанных поверхностей деталей при отделке зависит от метода обработки, материалов детали, характеристик инструмента, режимов и других условий отделки. Возможные методы обработки и их характеристики приведены в табл. 2.4.

Шлифованию и полированию подвергают детали с необработанной поверхностью, с шероховатостью не ниже  $Rz\ 40$ .

Для отделки поверхностей деталей из стали, меди и ее сплавов, цинковых, титановых, алюминиевых сплавов используют преимущественно методы шлифования и полирования абразивными инструментами, пастами и суспензиями, а также тонкое точение, тонкое фрезерование и растачивание лезвийными алмазными инструментами.

Несколько операций отделки поверхностей составляют отдельный этап общего техпроцесса изготовления детали. Типовой технологический маршрут отделки поверхности шероховатостью  $Ra\ 0,63$  состоит из следующих операций: обезжиривание, травление, предварительная отделка (шлифование, точение или грубое полирование), заключительная отделка (полирование, обезжиривание, контроль).

Таблица 2.4

**Характеристики методов обработки поверхностей резанием**

Метод обработки резанием	Квалитет точности	<i>Ra</i> , мкм
Точение и растачивание: черновое                   или однократное чистовое тонкое	11 – 14  10 7 – 8	5 – 40  25 – 5 0,32 – 0,63
Фрезерование и строгание: черновое чистовое тонкое	11 – 12 8 – 11 7 – 9	10 – 20 1,25 – 5 0,63 – 1,25
Сверление	12	5 – 20
Зенкерование	11	5 – 10
Развертывание: однократное двукратное тонкое и ручное	10 – 11	1,25 1,25 0,63
Протягивание: внутреннее наружное	8 – 9 8 – 10	2,5 1,25 – 5
Шлифование: предварительное чистовое тонкое	9 6 – 8 5 – 6	1,25 – 2,5 0,63 – 1,25 0,16 – 0,63
Полирование	без размеров	0,63 – 1,25
Суперфиниш	без размеров	0,16 – 0,63
Хонингование	без размеров	0,04 – 0,32
Доводка (притирка)	5 и точнее	0,01 – 0,32

## Раздел 3

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА

#### Тема 3.1

#### **ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ, МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

##### **3.1.1. Общие понятия, классификационные признаки и основные конструктивно-технологические разновидности печатных плат**

*Печатные платы* (ПП) – это элементы конструкции, которые состоят из плоских проводников в виде участков металлизированного покрытия, размещенных на диэлектрическом основании и обеспечивающих соединение элементов электрической цепи. Они получили широкое распространение в производстве модулей, ячеек и блоков РЭС благодаря следующим *преимуществам* (по сравнению с традиционным монтажом проводниками и кабелями):

- увеличение плотности монтажных соединений и возможность микроминиатюризации изделий;
- получение печатных проводников, экранирующих поверхностей в одном технологическом цикле;
- гарантированная стабильность и повторяемость электрических характеристик (проводимости, паразитных емкости и индуктивности);
- повышенная стойкость к климатическим и механическим воздействиям;
- унификация и стандартизация конструктивных и технологических решений;
- увеличение надежности;
- возможность комплексной автоматизации монтажно-сборочных и контрольно-регулирующих работ;
- снижение трудоемкости, материалоемкости и себестоимости.

К недостаткам печатного монтажа следует отнести сложность внесения изменений в конструкцию и ограниченную ремонтпригодность.

Элементами ПП являются: диэлектрическое основание, металлическое покрытие в виде рисунка печатных проводников и контактных площадок, монтажные и фиксирующие отверстия. Они должны соответствовать требованиям ГОСТ 23752-86 и отраслевых стандартов.

В настоящее время разработано большое число конструктивно-технологических разновидностей ПП. В зависимости от числа проводящих слоев ПП разделяются:

- на односторонние (ОПП),
- на двусторонние (ДПП),
- на многослойные (МПП);
- на жесткие и гибкие платы (ГПП) – по конструктивному исполнению;
- на платы с проводным монтажом (рис. 3.1).

*ОПП* выполняются на слоистом прессованном или рельефном литом основании без металлизации или с металлизацией (табл. 3.1) отверстий. Платы на слоистом диэлектрике просты по конструкции и экономичны в изготовлении. Высокую технологичность и нагревостойкость имеют рельефные литые платы, на одной стороне которых расположен печатный монтаж, а на другой – объемные элементы. Более надежны в эксплуатации платы с металлизированными отверстиями.

*ДПП* имеют проводящий рисунок на обеих сторонах диэлектрического или металлического основания, а необходимые соединения выполняются с помощью металлизированных отверстий. Такие платы позволяют реализовать более сложные схемы, обладают повышенной плотностью монтажа и надежностью соединений, имеют лучший теплоотвод, однако требуют нанесения изоляционного покрытия и сложны в изготовлении. Расположение элементов печатного монтажа на металлическом основании позволяет решать проблему теплоотвода в мощной радиопередающей аппаратуре.

*МПП* состоят из чередующихся слоев изоляционного материала и проводящего рисунка, соединенных клеевыми прокладками в монолитную структуру путем прессования. Электрическая связь между проводящими слоями выполняется перемычками, печатными элементами или химико-гальванической металлизацией. По сравнению с ОПП и ДПП многослойные ПП характеризуются повышенной плотностью монтажа и надежностью, устойчивостью к механическим и климатическим воздействиям, уменьшением размеров конструкции и сокращением количества контактов. Соотношение трудоемкости изготовления плат ОПП : ДПП : МПП = 1 : 4 : 20. Большая трудоемкость изготовления, высокая точность рисунка и совмещения отдельных слоев, низкая ремонтпригодность и сложность технологического оборудования, высокая стоимость вынуждают применять МПП только для тщательно отработанных конструкций электронно-вычислительной, авиационной и космической аппаратуры. Классификация МПП приведена на рис. 3.2.

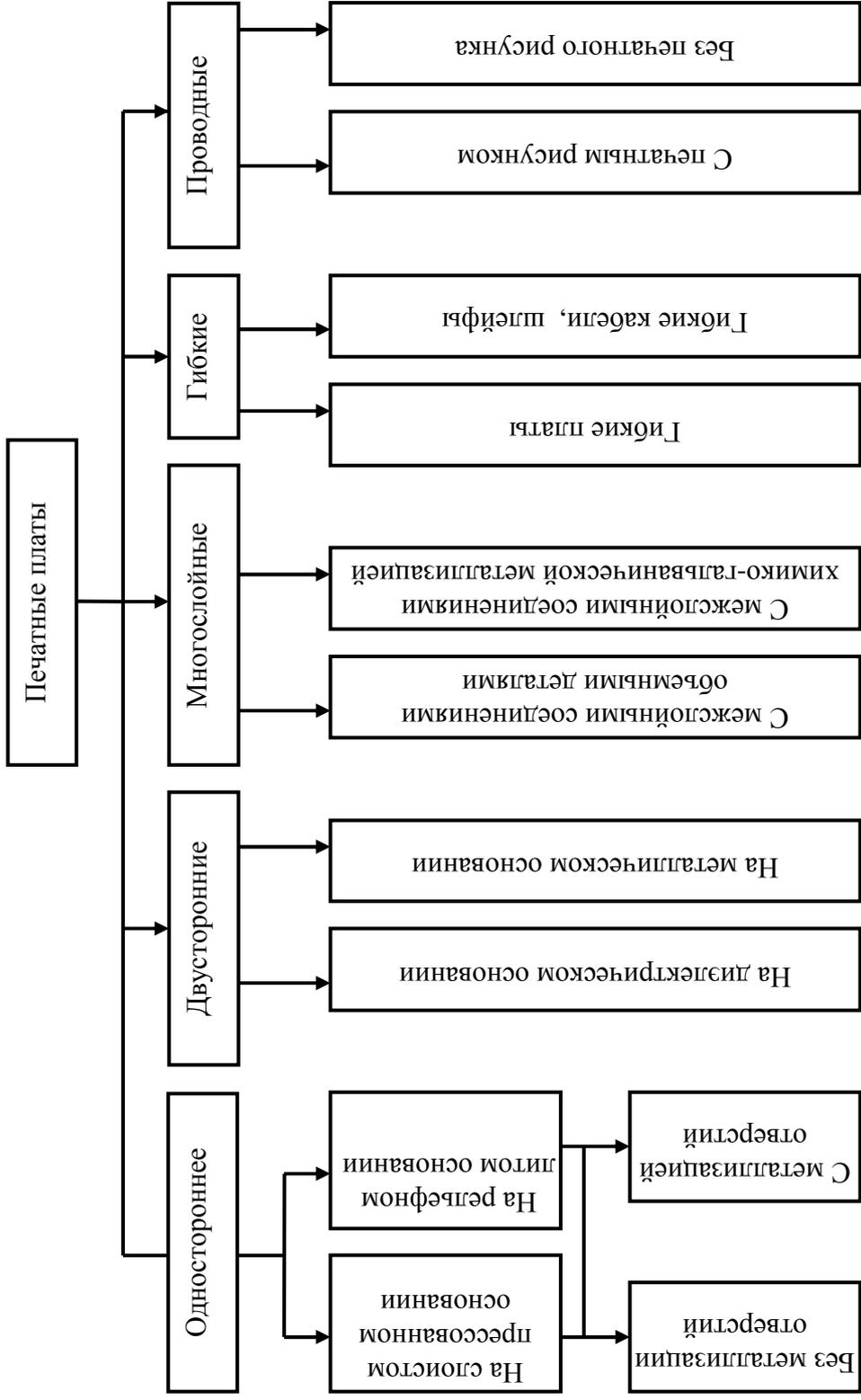


Рис. 3.1. Классификация печатных плат

**Конструктивные варианты: ОПП и ДПП**

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



**Рис. 3.2. Классификация многослойных печатных плат**

*ГПП* выполняются конструктивно как ОПП и ДПП, но на эластичном основании, и применяются для конструкций, подвергаемых вибрациям, изгибам, или когда плате, после установки ЭРЭ, необходимо придать компактную изогнутую форму. Разновидностью ГПП являются гибкие печатные кабели (ГПК), которые состоят из одного или нескольких слоев толщиной 0,06 – 0,3 мм с печатными проводниками и применяются для межблочного монтажа.

*Проводные платы* представляют собой диэлектрическое основание, на котором выполняют печатный монтаж или его отдельные элементы (контактные площадки, шины питания и заземления), а необходимые электрические соединения проводят изолированными проводами диаметром 0,1 – 0,2 мм. Трехслойная проводная плата эквивалентна по плотности монтажа восьмислойной МПП. Проводные платы нашли применение на этапах макетирования, разработки опытных образцов, в мелкосерийном производстве, когда проектирование и изготовление МПП неэкономично.

В соответствии с ГОСТ 23751-86 установлены пять классов точности для выполнения размеров элементов конструкций ПП (табл. 3.2).

Таблица 3.2

**Наименьшие номинальные значения основных размеров элементов конструкции печатных плат**

Параметр	Основные размеры элементов ПП для класса точности				
	1	2	3	4	5
Ширина проводника, $t$ , мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
Расстояние между центрами (осями) проводников, $S$ , мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
Ширина гарантированного пояса контактной площадки $B$ , мм	0,3	0,2	0,1	0,05	0,025
Параметр, $\gamma$	0,40	0,40	0,33	0,25	0,20

Параметр  $\gamma$  представляет собой отношение номинального значения диаметра наименьшего из металлизированных отверстий к толщине печатной платы.

### 3.1.2. Материалы для изготовления ПП

Физико-механические свойства материалов должны удовлетворять установленным техническим условиям и обеспечивать качественное изготовление ПП в соответствии с типовыми ТП.

Для изготовления плат применяют *слоистые пластики* – фольгированные диэлектрики, плакированные электролитической медной фольгой. В

качестве основы в слоистых пластиках используют: *гетинакс* (спрессованные слои электроизоляционной бумаги, пропитанные фенольной смолой), *стеклотекстолиты* (спрессованные слои стеклоткани, пропитанные эпоксифенольной смолой), и другие материалы (табл. 3.3).

Таблица 3.3

**Основные материалы для изготовления печатных плат**

Материал	Марка	Толщина		Область применения
		фольги, мкм	материала, мм	
Гетинакс: фольгированный огнестойкий влагостойкий	ГФ-1(2)	35; 50	1 – 3	ОПП ДПП ДПП
	ГПФ-2-50Г	50	1 – 3	
	ГОФВ-2-35	35	1 – 3	
Стеклотекстолит: фольгированный с адгезионным слоем с тонкой фольгой	СФ-1(2)	35; 50	0,8 – 3	ОПП, ДПП ДПП ОПП, ДПП
	СТЭК	–	1,0 – 1,5	
	СТПА-1	5	0,1 – 3	
Фольгированный ди- электрик: тонкий для МПП для микроэлектроники	ФДТ-1	50	0,5	МПП МПП МПП
	ФДМ-1(2)	35	0,2 – 0,35	
	ФДМЭ-1(2)	35	0,1 – 0,3	
Лавсан фольгированный	ЛФ-1	35	0,05	ГПК ГПК
	ЛФ-2	50	0,1	
Фторопласт: фольгированный армированный	ФФ-4	50	1,5 – 3	ДПП ГПК
	ФАФ-4Д	50	0,5 – 3	
Полиимид фольгирован- ный	ПФ-1	35	0,05	ГПП ГПК
	ПФ-2	50	0,1	
Стеклотекстолит	СТАП-1-5	0,08 – 2,0	0,005	МПП, ДПП
	СТАП-2-35	0,08 – 2,0	0,035	

*Гетинакс*, обладая удовлетворительными электроизоляционными свойствами в нормальных климатических условиях, хорошей обрабатываемостью и низкой стоимостью, нашел применение в производстве бытовой РЭА. Для ПП, эксплуатируемых в сложных климатических условиях с широким диапазоном рабочих температур (– 60... + 180 °С) в составе электронно-вычислительной аппаратуры, техники связи, измерительной техники, применяют более дорогие *стеклотекстолиты*. Они отличаются широким диапазоном рабочих температур, низким (0,2 ... 0,8 %) водопоглощением, высокими значениями объемного и поверхностного сопротивлений, стойкостью к короблению. Недостатки – возможность отслаивания фольги при термоударах, наволакивание смолы при сверлении отверстий. Для изготовления фольгированных диэлектриков используется в основном электролитическая медная фольга, одна сторона которой должна иметь гладкую по-

верхность (не ниже восьмого класса чистоты) для обеспечения точного воспроизведения печатной схемы, а другая должна быть шероховатой с высокой микронеровностью не менее 3 мкм для хорошей адгезии к диэлектрику.

*Керамические* материалы характеризуются высокой механической прочностью, которая незначительно изменяется в диапазоне температур (20...700 °С), стабильностью электрических и геометрических параметров, низкими (до 0,2 %) водопоглощением и газовыделением при нагреве в вакууме, однако являются хрупкими и имеют высокую стоимость.

В качестве *металлической* основы плат используют сталь, медь, титан, алюминий. На металлических основаниях изолирование токоподводящих участков осуществляют с помощью специальных эмалей, легкоплавким стеклом. Изолирующий слой на поверхности алюминия получают анодным оксидированием. Такие основания характеризуются повышенной теплопроводностью, конструкционной прочностью, ограничениями по быстрдействию из-за сильной связи проводников с подложкой.

В качестве основы для ПП СВЧ-диапазона используют неполярные (фторопласт, полиэтилен, полипропилен) и полярные (полистирол, полифениленоксид) *полимеры*. Для изготовления микроплат и микросборок СВЧ-диапазона применяют керамические материалы, имеющие стабильные электрические характеристики и геометрические параметры.

*Полиимидная пленка* используется для изготовления гибких плат, обладающих высокой прочностью на растяжение, химической стойкостью, несгораемостью. Она имеет наиболее высокую среди полимеров температурную устойчивость, т. к. не теряет гибкости от температур жидкого азота до температур эвтектической пайки кремния с золотом (400 °С). Кроме того, она характеризуется низким газовыделением в вакууме, радиационной стойкостью, отсутствием наволакивания при сверлении. Недостатки – повышенное водопоглощение и высокая стоимость.

## Тема 3.2 ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПП

### 3.2.1. Методы изготовления ПП

Методы изготовления плат разделяют на три группы (рис. 3.3):

- субтрактивные,
- аддитивные,
- последовательного наращивания.

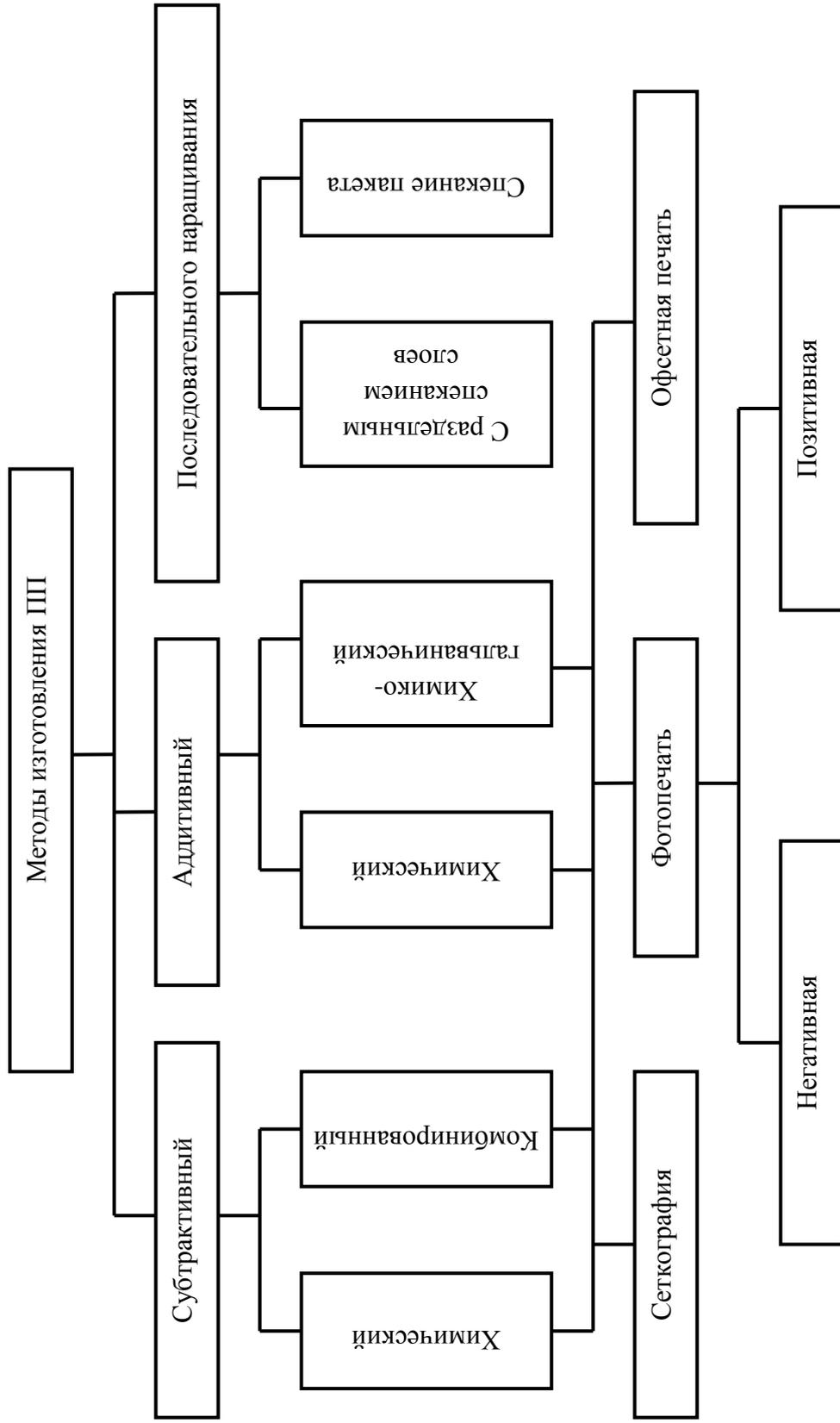


Рис. 3.3. Методы изготовления коммуникационных плат и нанесения рисунка

При *субтрактивных* методах (от лат. *substratio* – отнимание) проводящий рисунок образуется путем удаления фольги с незащищенных участков поверхности. Для этого на фольгированный диэлектрик наносится рисунок схемы, а незащищенные участки фольги стравливаются. Дополнительная химико-гальваническая металлизация монтажных отверстий позволяет получать двусторонние платы комбинированными методами. К недостаткам субтрактивного химического метода относятся значительный расход меди и наличие бокового подтравливания элементов печатных проводников, что уменьшает адгезию фольги к основанию.

Указанного недостатка лишен *аддитивный* (от лат. *additio* – прибавление) метод изготовления ПП, основанный на избирательном осаждении химической меди на нефольгированный диэлектрик. При этом используют диэлектрик с введенным в его состав катализатором и адгезивным слоем на поверхности. Платы, изготовленные аддитивным методом, имеют высокую разрешающую способность (проводники шириной до 0,1 мм), затраты на производство таких плат ниже – экономятся медь, химикаты для травления, улучшается экологическая обстановка на предприятиях. Аддитивный метод имеет более высокую надежность, т.к. проводники и металлизацию отверстий получают в едином химико-гальваническом процессе, устраняется подтравливание элементов печатного монтажа. Однако применение аддитивного метода в массовом производстве ограничено низкой производительностью процесса химической металлизации, интенсивным воздействием электролитов на диэлектрик, недостаточной адгезией проводников.

При *полуаддитивном*, или химико-гальваническом, методе на диэлектрическом основании сплошной токопроводящий слой получают химическим осаждением, а затем усиливают его до необходимой толщины в местах расположения печатных проводников и контактных площадок электрохимическим методом. В этом случае достигается лучшая адгезия рисунка ПП к диэлектрику (прочность на отрыв в 1,5 раза выше, чем у аддитивного). Толщина меди получается одинаковой на всех участках плат и в металлизированных отверстиях.

Метод *последовательного наращивания* применяют при формировании многослойной структуры на керамической плате, состоящей из чередующихся изоляционных и проводящих слоев. В изоляционных слоях в местах создания межслойных переходов выполняют окна, через которые при нанесении следующего проводящего слоя формируется электрическое межслойное соединение. При использовании толсто пленочной технологии

изоляционные и проводящие составы наносят путем трафаретной печати и затем вжигают. Преимущества этого метода – высокая надежность плат, большая гибкость при изменениях схемы, незначительные затраты на оборудование. Недостатки – наличие операции вжигания, невысокая производительность процесса.

Базовыми технологическими процессами (ТП) в производстве ПП являются: нанесение рисунка схемы на основание; получение рисунка схемы (травление, электрохимическая металлизация); механическая обработка плат (сверление, пробивка отверстий); защита печатных проводников для обеспечения пайки; контроль параметров печатных проводников.

Для изготовления *МПП* разработаны многочисленные варианты конструктивно-технологического исполнения, каждый из которых характеризуется рядом достоинств и недостатков, определяющих их выбор. Практический опыт изготовления МПП показывает, что наиболее технологичным является вариант МПП с *металлизацией сквозных отверстий*. Он позволяет получать по 20 слоев МПП, характеризуется высокой плотностью, хорошим качеством межслойных соединений, относительной простотой и экономичностью. При этом методе используются: для наружных слоев односторонний фольгированный диэлектрик, для внутренних – одно- или двусторонний фольгированный диэлектрик и в качестве межслойной изоляции стеклоткань СПТ-3. Из этих материалов изготавливают заготовки, в которых пробивают базовые отверстия для совмещения слоев и производят очистку поверхностей. На заготовках внутренних слоев рисунок получают с двух сторон негативным фотохимическим методом, выполняя при необходимости контактные переходы химико-гальванической металлизацией. Рисунок наружных слоев получают комбинированным позитивным фотохимическим методом. Изготовленные слои совмещают друг с другом по базовым отверстиям, прокладывая между ними межслойную изоляцию, и спрессовывают в монолитную структуру.

### **3.2.2. Формирование рисунка схемы**

Нанесение рисунка схемы или защитного рельефа требуемой конфигурации необходимо при осуществлении процессов металлизации и травления. Рисунок должен иметь четкие границы с точным воспроизведением тонких линий, быть стойким к травильным растворам, не загрязнять платы и электролиты, легко сниматься после выполнения своих функций. Перенос рисунка печатного монтажа на фольгированный диэлектрик осуществляют методами сеткографии, офсетной печати и фотопечати. Выбор мето-

да зависит от конструкции платы, требуемой точности и плотности монтажа, серийности производства.

*Сеткографический* метод нанесения рисунка схемы наиболее рентабелен для массового и крупносерийного производства плат при минимальной ширине проводников и расстоянии между ними  $\geq 0,5$  мм, точность воспроизведения изображения  $\pm 0,1$  мм. Суть метода заключается в нанесении на плату специальной кислотостойкой краски путем продавливания ее резиновой лопаткой (ракелем) через сетчатый трафарет, в котором необходимый рисунок образован открытыми ячейками сетки (рис. 3.4).

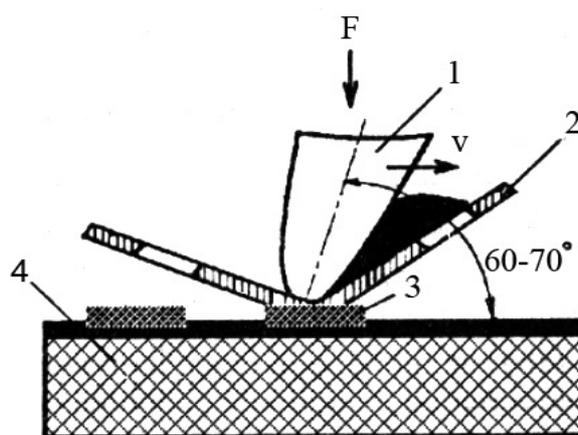


Рис. 3.4. Принцип трафаретной печати:  
1 – ракель, 2 – трафарет, 3 – краска, 4 – основание

Для изготовления трафарета используют металлические сетки из нержавеющей стали, полиэфирных волокон и капрона. Одним из недостатков сеток является их растяжение при многократном использовании.

Для получения рисунка ПП используют термоотверждающиеся краски СТ 3, 5; СТ 3, 12, которые сушат либо в термошкафу при температуре  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 40 мин, либо на воздухе в течение 6 ч, что удлиняет процесс сеткографии. Более технологичными являются фотополимерные композиции ЭП 918 и ФКП-ТЗ с ультрафиолетовым отверждением в течение 10...15 сек, что является решающим фактором при автоматизации процесса.

*Офсетная печать* применяется для крупносерийного производства ПП при малой номенклатуре схем. Разрешающая способность  $0,5 - 1$  мм, точность получаемого изображения составляет  $\pm 0,2$  мм. Суть метода состоит в изготовлении печатной формы (клише), на поверхности которой формируется рисунок платы. Форма закатывается трафаретной краской с помощью специального валика, а затем печатный цилиндр, покрытый сло-

ем офсетной резины, переносит краску с формы на подготовленную поверхность основания платы (рис. 3.5).

Точность печати и резкость контуров определяются параллельностью валика и основания, типом и консистенцией краски. С помощью одного клише можно выполнить неограниченное число оттисков. Производительность метода ограничена длительностью цикла (нанесение краски – перенос) и не превышает 200...300 оттисков в час. Недостатки метода: длительность процесса изготовления клише, сложность изменения рисунка схемы, трудность получения беспористых слоев, высокая стоимость оборудования.

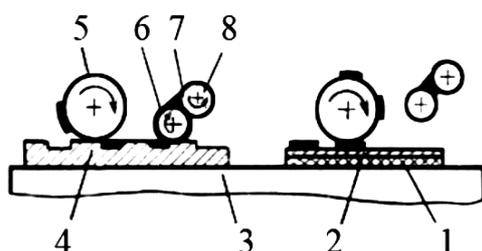


Рис. 3.5. Схема установки офсетной печати:

1 – диэлектрик, 2 – медная фольга, 3 – основание, 4 – печатная форма, 5 – офсетный цилиндр, 6 – валик для нанесения краски, 7 – краска, 8 – прижимной валик

*Фотографический* метод нанесения рисунка позволяет получать минимальную ширину проводников и расстояния между ними 0,1...0,15 мм с точностью воспроизведения до 0,01 мм. С экономической точки зрения этот способ менее рентабельный, но позволяет получать максимальную разрешающую способность рисунка и поэтому применяется в мелкосерийном и серийном производстве при изготовлении плат высокой плотности и точности. Способ основан на использовании светочувствительных композиций, называемых фоторезистами (негативные и позитивные), которые должны обладать: высокой чувствительностью; высокой разрешающей способностью; однородным по всей поверхности беспористым слоем с высокой адгезией к материалу платы; устойчивостью к химическим воздействиям; простотой приготовления, надежностью и безопасностью применения.

Фоторезисты разделяются на негативные и позитивные; сухие и жидкие. Негативные фоторезисты под действием излучения образуют защитные участки рельефа в результате фотополимеризации и задубливания. Освещенные участки перестают растворяться и остаются на поверхности подложки. Позитивные фоторезисты передают рисунок фотошаблона без изменений. При световой обработке экспонированные участки разрушаются и вымываются.

Типовые техпроцессы изготовления односторонних, двуслойных ПП приведены на рис. 3.6 и рис. 3.7. Последовательность основных операций изготовления МПП на полиимидной пленке приведена на рис. 3.8.

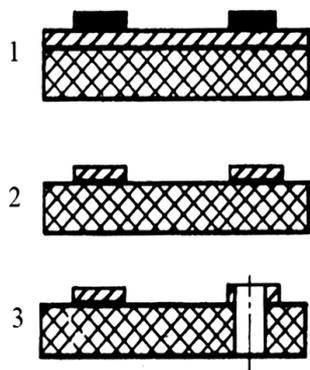


Рис. 3.6. Схема технологического процесса изготовления ОПП:

1 – нанесение защитного рисунка, 2 – получение проводников, 3 – выполнение отверстий

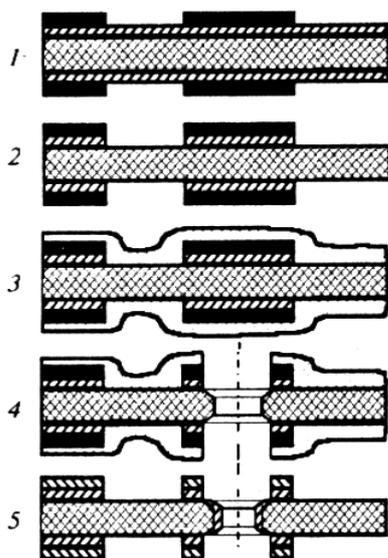


Рис. 3.7. Схема процесса изготовления ДПП комбинированным негативным методом:

1 – нанесение защитного рисунка, 2 – травление меди, 3 – нанесение лака, 4 – сверление и зенкование отверстий, 5 – металлизация отверстий

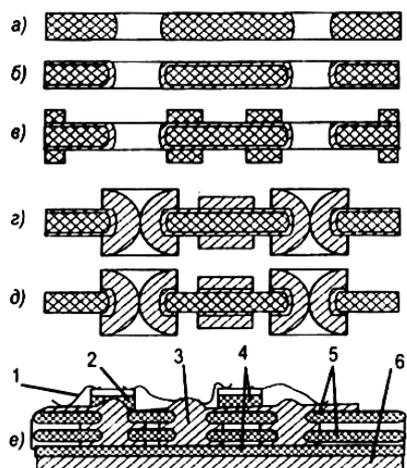


Рис. 3.8. Последовательность основных операций изготовления МПП на полиимидной пленке:

*a* – пленка с протравленными отверстиями, *б* – пленка с нанесенным подслоем, *в* – нанесение защитного слоя фоторезиста, *г* – наращивание слоя меди 15...20 мкм, *д* – стравливание подслоя; *е* – структура из спаянных слоев (1 – внешние выводы бескорпусной ИС, 2 – кристалл, 3 – вакуумный спай через металлизированные отверстия, 4 – клей; 5 – двусторонние полиимидные платы, 6 – алюминиевое основание)

### 3.2.3. Типовые операции техпроцесса изготовления печатных плат

Базовые технологические процессы изготовления ОПП и ДПП состоят из набора типовых технологических операций. Выбор операций определяется требованиями, предъявляемыми к готовым печатным платам, производительностью оборудования, условиями производства и экономической эффективностью процесса. Ниже рассмотрены назначение и основные методы выполнения технологических операций изготовления печатных плат.

*Входной контроль* материалов на предприятии – изготовителе ПП служит для обеспечения гарантированного качества получаемой продукции. При этом определяется соответствие физико-механических и эксплуатационных свойств материалов техническим условиям.

При *изготовлении заготовок* их размеры определяются требованиями чертежа и наличием по всему периметру заготовки технологического поля. На последнем выполняются фиксирующие отверстия для базирования деталей в процессе изготовления и тестовые элементы. Ширина технологического поля не превышает 10 мм для ОПП и ДПП и 20...30 мм для МПП. Малогабаритные платы размещают на групповой заготовке с расстоянием между ними 5...10 мм.

*Подготовка поверхности заготовки* включает очистку исходных материалов от оксидов, жировых пятен, смазки и других загрязнений, специальную обработку диэлектриков, контроль качества выполнения операций. В зависимости от характера и степени загрязнений очистку проводят механическими, химическими, электрохимическими, плазменными и другими методами или их сочетанием.

*Получение защитного рисунка* на поверхности платы в виде печатных элементов и пробельных мест осуществляется способами фотопечати, сеткографии и офсетной печати. Полученный рисунок контролируется визуально и с помощью различных оптических приборов на отсутствие дефектов. При обнаружении незначительных дефектов (пор, трещин, отверстий) их ретушируют лаком, а при невозможности восстановления брака наносят повторно.

Сенсибилизация и активирование поверхности применяются для придания диэлектрическому материалу способности к металлизации, т.е. формирования на нем каталитически активного слоя.

*Химическое меднение* – первый этап металлизации поверхностей заготовок и стенок монтажных отверстий.

*Гальваническая металлизация* применяется для усиления слоя химической меди, нанесения металлического резиста, создания на концевых печатных контактах специальных покрытий из палладия, золота, серебра, родия или сплавов на их основе. Гальваническое меднение проводят сразу после химического.

*Травление меди* – это процесс избирательного ее удаления с непроводящих (пробельных) участков для формирования проводящего рисунка печатного монтажа. Его проводят в растворе на основе хлорного железа, персульфата аммония, хлорной меди, перекиси водорода, хромового ангидрида, хлорида натрия. Выбор травильного раствора определяется типом применяемого резиста, скоростью травления, размерами бокового подтравливания, возможностью регенерации и экономичностью всех стадий процесса. Наибольшее распространение в производстве печатных плат получили травильные растворы на основе хлорного железа. Они отличаются высокой и равномерной скоростью травления, малым боковым подтравливанием, высокой четкостью получаемых контуров, незначительным содержанием токсичных веществ, экономичностью.

*Обработка монтажных отверстий* производится с высокой точностью на специализированных одношпиндельных и многошпиндельных сверлильных станках с ЧПУ. От качества выполнения этой операции зависит качество последующих операций металлизации, а следовательно, и качество платы в целом. Сверление отверстий выполняют специальными спиральными сверлами из металлокерамических твердых сплавов.

Металлорезист наносят комбинированным позитивным фотохимическим методом. Он предназначен для защиты рисунка печатного монтажа при травлении, что обеспечивает более высокое качество изделий, чем при использовании фоторезистов, улучшает и сохраняет паяемость контактных поверхностей. В качестве металлорезиста применяют золото, серебро, никель, олово и сплавы на их основе. Широкое применение в промышленности вследствие своей экономичности получили сплавы: олово-свинец, олово-никель, олово-висмут и некоторые другие. Их наносят на поверхности заготовок электрохимическим способом.

*Обработка заготовок по контуру* производится после полного изготовления платы. Чистовой контур получают штамповкой, обработкой на гильотинных ножницах, на танках с прецизионными алмазными пилами и фрезерованием.

*Выходной контроль платы* предназначен для определения степени ее соответствия требованиям чертежа и техническим условиям. Осуществляется выходной контроль внешнего вида, инструментальный контроль геометрических размеров, оценка точности выполнения отдельных элементов,

проверка металлизации отверстий, определение целостности токопроводящих цепей и сопротивления изоляции.

### 3.2.4. Методы коммутации

В мелкосерийном производстве на этапе разработки опытных образцов применяют комбинированные методы монтажа: многопроводный упорядоченный фиксируемыми проводами, многопроводный неупорядоченный, стежковый неупорядоченный (рис. 3.9, 3.10).

*Стежковый* монтаж заключается в прокладывании изолированных проводов по кратчайшим расстояниям на поверхности ДПП и в монтажных отверстиях с образованием петель и последующим подпаиванием их к контактному площадкам платы. Процесс осуществляется на станках с ЧПУ.

Новым направлением в технике монтажа является применение *ткачных коммутационных устройств* (ТКУ) – рис. 3.12, представляющих собой тканый материал, изготовленный из электропроводящих и диэлектрических нитей, с закрепленными на нем ЭРЭ и ИМС. ТКУ изготавливаются на ткацких автоматах, дополнительно снабженных механизмами подачи и натяжения электропроводящих и диэлектрических нитей, а также петлеобразования. После изготовления ТКУ им придают жесткость. Соединение электрических проводников в контактных узлах и присоединение навесных ЭРЭ осуществляются контактной микросваркой.

Наиболее распространенными методами коммутации функциональных модулей микроэлектронной аппаратуры (МЭА) являются многослойные печатные платы, толсто пленочная многослойная разводка, разводка на многослойной керамике, толсто пленочная многослойная разводка на жестких и гибких платах.

Толсто пленочная многослойная разводка выполняется путем последовательного нанесения на жесткую диэлектрическую подложку проводящих и диэлектрических паст методом трафаретной печати и последующего их вжигания.

Многослойные коммутационные платы на керамической подложке получают путем прессования, литьем под давлением, отливкой пленок.

Многослойная разводка на гибких полимерных платах позволяет принимать форму корпуса любой конфигурации, обеспечивает малую толщину и массу, ударопрочность. Она эффективна при создании межъячеечной и межблочной коммутации. К недостаткам полиимидных пленок можно отнести несколько повышенное водопоглощение и относительно высокую стоимость их производства, которая не столь существенна для изделий микроэлектронной аппаратуры ввиду малой массы потребляемого материала.

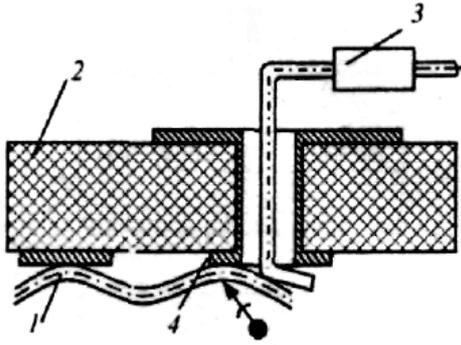


Рис. 3.9. Схема проводного монтажа незакрепленными проводами:

1 – провод, 2 – основание платы, 3 – электрорадиоэлементы, 4 – монтажные площадки

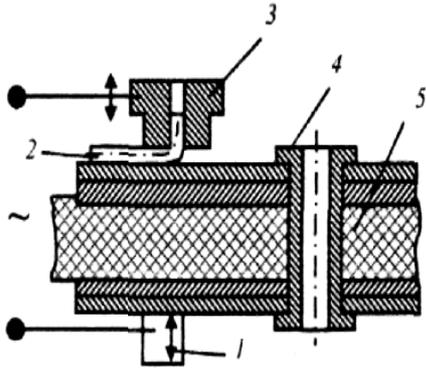


Рис. 3.10. Схема сварки монтажных проводов: 1, 3 – электроды,

2 – провод, 4 – монтажная площадка, 5 – плата

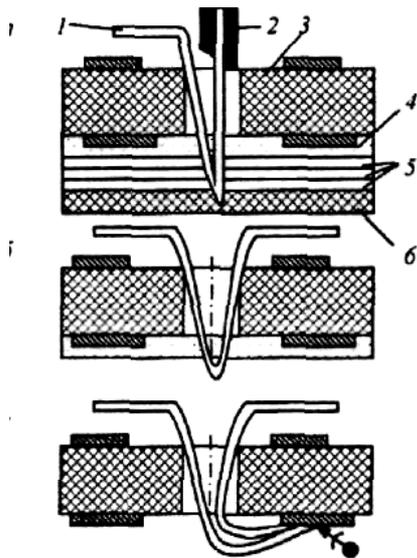


Рис. 3.11. Схема стежкового монтажа: 1 – провод, 2 – игла, 3 – плата, 4 – кабельная бумага, 5 – пакет резиновых прокладок, 6 – защитный слой

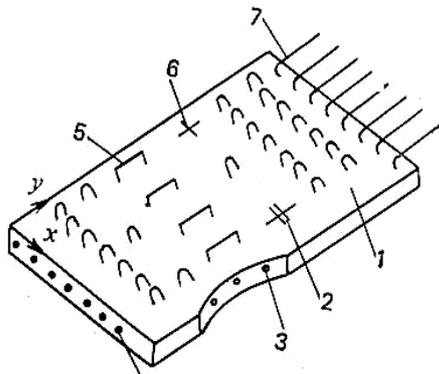


Рис. 3.12. Структура тканого устройства коммутации: 1 – многослойное изоляционное поле, 2, 3 – электропроводящие нити, 4 – монтажные узлы,

5 – петли, 6 – контактные площадки, 7 – удлиненные выводы для подсоединения к разъёмам

### 3.2.5. Конструктивные покрытия печатных плат

Конструктивные покрытия обеспечивают стабильность электрических, механических и других параметров ПП. Покрытия могут быть металлическими и неметаллическими (табл. 3.4).

Таблица 3.4

**Характеристики конструктивных покрытий**

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

Наибольшее распространение получили покрытия на основе олова и свинца, например, О-С(66)12 опл. Кроме того, применяется покрытие сплавами олова и висмута или никеля, например О-Ви(99,8)9 или НЗ.0-Ви(99,8)6, а также никелевое покрытие НЗ или Н5.

Кроме контактных площадок, предназначенных для пайки, на печатных платах могут находиться поверхности, обеспечивающие холодный контакт. В первую очередь это относится к соединителям непосредственного контактирования (например, СНП 15-96). Предъявляемые требования к таким площадкам: стабильное низкое переходное сопротивление и высокая износоустойчивость. В качестве многослойного покрытия используется такое, в верхнем слое которого – золото или палладий, например НЗ, ЗлО,25-3,00 или СрЗ, Пд 0,25-1,00. Кроме того, иногда встречается химическое золочение - Хим. Зл-0,2.

Неметаллические конструктивные покрытия (эпоксидные смолы, эмали, оксидные пленки) используют для защиты печатных проводников и поверхности основания печатной платы от воздействия припоя, элементов проводящего рисунка от замыкания навесными элементами, от влаги при

эксплуатации. В простейшем случае плата после монтажа всех элементов и промывки покрывается лаком (одним или несколькими слоями). Лак наносится методами окунания, полива или распыления, и под ним оказываются не только все проводники, но и элементы, что не всегда желательно. Некоторые элементы не допускают лакировки, например соединители, различные лепестки, контакты и ряд микросхем. При окунании лак попадает во все щели и зазоры, в которых он после полимеризации образует сгустки, причиняющие (из-за усадок) механические повреждения, так что в процессе конструирования необходимо предусматривать зазоры, обеспечивающие удаление остатков жидкого лака (в производстве для этого применяется центрифугирование). При любых способах нанесения лак проникает по капиллярам во внутренние полости соединителей и выводит их из строя. Из-за сложностей технологического порядка от лакировки отказываются и защищают печатные платы масками.

В отличие от лакировки маска не обеспечивает полной защиты всей платы, но снижение общей стоимости производства является главным аргументом в пользу последнего варианта, тем более что при использовании защитной маски решается ряд других задач (например, она является технологической маской при нанесении гальванического покрытия).

В качестве материала защитных масок используются различные диэлектрические покрытия на основе эпоксидных смол, сухого пленочного резиста (СПФ-защита), холодные эмали, оксидные пленки и др. Для изготовления защитных покрытий применяются материалы фирм DuPont (Франция), MacDerm (Великобритания) и др.

### **Тема 3.3**

## **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

### **3.3.1. Особенности поверхностного монтажа**

Дальнейшее развитие техники печатного монтажа связано с широким внедрением поверхностного монтажа. Отличительная особенность технологии монтажа на поверхность – использование безвыводных элементов (без традиционных проволочных или ленточных выводов). Выводы у таких элементов заменены металлизированными поверхностями. Если все-таки выводы имеются, то формируются так, чтобы элементы допускали установку на поверхность платы. Размеры элементов, компокуемых

на поверхности, на один – два порядка меньше соответствующих аналогов в традиционном исполнении.

Технологии пайки элементов условно можно разделить на два направления: пайка волной и пайка в печи. Если ориентироваться на *пайку в печи*, то следует использовать компоненты, способные выдерживать кратковременный нагрев до температуры 280 °С в течение 30 с. В месте пайки должно находиться строго дозированное количество припоя, который наносится на требуемое место с помощью специальных установок или посредством паяльной маски (трафарета). Паяльная паста, наносимая на контактные площадки, представляет собой механическую смесь мелкодиспергированного стандартного припоя (микрочастиц или микросфер) со связующим составом, в который вводятся различные добавки, предохраняющие расплавленный припой от окисления и обеспечивающие смачиваемость мест пайки (флюсы), а также

Затем на плату устанавливаются, и временно закрепляются элементы, которые должны быть припаяны. Тяжелые элементы крепятся механически (зиг-замками или отгибанием выводов) либо приклеиваются быстротвердеющим клеем. Легкие элементы (а это большинство чип-элементов) удерживаются на печатной плате за счет адгезии паяльной пасты.

Далее плата подвергается кратковременному нагреву (как правило, ступенчатому) в специальных печах или конвейерных установках, где режим нагрева (пайки) строго регламентирован. В печах происходит плавление припоя и одновременная пайка всех элементов. После плавления часть припоя затекает под элемент и образует каплю на открытой части контактной площадки. На рис. 3.13 изображено поперечное сечение места пайки и основные его размеры.

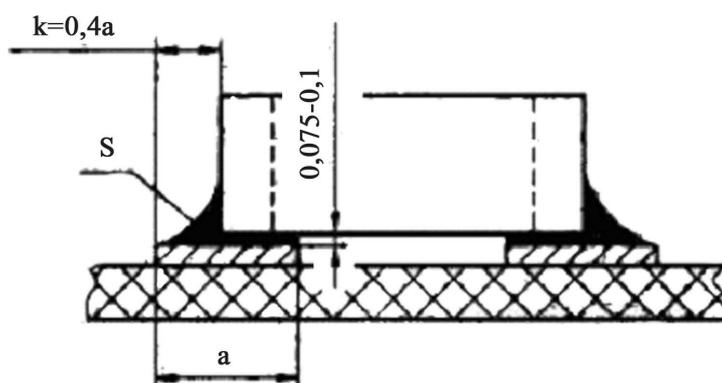


Рис. 3.13. Поперечное сечение места пайки

Короткое время нагрева и строгое соблюдение температурного режима обеспечивают сохранность печатной платы и элементов.

При пайке *волной* приклейка всех чип-элементов обязательна, иначе волна их просто смывает.

Элементы, которые по тем или иным причинам нельзя нагревать таким способом, следует паять отдельно на заключительном этапе (например, вручную).

### 3.3.2. Контроль качества и диагностика плат

С развитием и усложнением конструкций ПП и МПП возрастает сложность ТП, потребность в более эффективных методах и средствах контроля. Основными мерами повышения качества ПП и МПП являются: организация входного контроля материалов, межоперационный контроль, выходной контроль качества изделий. Основными видами выходного контроля ПП являются:

1. контроль внешнего вида;
2. инструментальный контроль геометрических параметров и оценка точности выполнения отдельных элементов, совмещения слоев;
3. проверка металлизации отверстий и их устойчивости к токовой нагрузке;
4. определение целостности токопроводящих цепей и сопротивления изоляции.

Весьма важным является тщательный контроль наиболее ответственных операций ТП (травление, металлизация, склеивание и др.), которые оказывают влияние на все остальные операции и автоматизация процесса контроля.

Классификацию методов контроля можно провести по следующим признакам:

1. по физической сути метода:
  - оптический;
  - рентгеновский;
  - тепловой;
  - электрофизический;
  - электрический;
  - радиотехнический;
  - металлографический;
  - радиационный;
  - ультразвуковой;

2. по видам связи с контролируемым объектом:
  - контактные;
  - бесконтактные;
3. по характеру воздействия на платы:
  - разрушающие,
  - неразрушающие;
4. по степени определения дефектов:
  - контроль работоспособности (явный дефект),
  - диагностический (скрытый дефект),
  - прогнозирующий.

*Оптический* метод контроля прост и нагляден, имеет высокую разрешающую способность. Недостаток его в субъективности и низкой производительности. Используются микроскопы МБС-2, МИИ-4, МРР-2Р, растровый электронный микроскоп МРЭМИ-2 и др.

*Рентгеновский* метод применяется для контроля токопроводящих цепей МПП и подразделяется на рентгентелевизионный, стереорентгенографии и томографии. Наибольшее распространение получил рентгентелевизионный метод с использованием рентгентелевизионных микроскопов МТР-1, МТР-3, МТР-4. Данный способ позволяет выявлять характер, вид и местонахождение дефектов. Однако он обладает недостаточной разрешающей способностью для МПП и низкой производительностью контроля. Стереорентгенография применяется при выявлении разрывов печатных проводников после прессования и в готовой плате. Томография обладает возможностью контроля межслойных изображений, его применяют для послойного контроля токопроводящих цепей МПП.

*Тепловой контроль* токопроводящих цепей МПП основан на измерении градиента температуры в местах локализации дефекта при нагреве, который осуществляется за счет пропуска тока через контролируемую цепь. С помощью данного метода можно обнаружить следующие дефекты печатного монтажа: пористость металлизации, короткое замыкание, утонение (подтравливание) проводников, пониженное сопротивление изоляции.

## Раздел 4

### УЗЛЫ И БЛОКИ С ПЛЕНОЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

#### Тема 4.1

### ПОЛУЧЕНИЕ ПЛЕНОК НЕВАКУУМНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

#### 4.1.1. Узлы и блоки с пленочными элементами.

#### Схема процесса получения пленок невакуумной технологией

Производство как дискретных (отдельных) полупроводниковых приборов, так и интегральных микросхем (ИМС) в основном базируется на одних и тех же технологических процессах (эпитаксии, фотолитографии, травлении, диффузии, нанесении пленок и др.). При изготовлении всех видов полупроводниковых приборов и ИМС в том или ином объеме используется технологический процесс нанесения тонких пленок в вакууме - тонкопленочная технология.

Основными конструктивными и схемными элементами и компонентами как пленочных, так и толстопленочных гибридных микросхем являются: диэлектрическая подложка; пленочные резисторы, конденсаторы, проводники и контактные площадки, а также распределенные пленочные  $RC$ -,  $LC$ - и  $RLC$ -структуры; навесные бескорпусные полупроводниковые приборы и микросхемы; навесные миниатюрные пассивные компоненты; корпус.

Сущность процесса изготовления *толстопленочных* интегральных микросхем (рис. 4.1) заключается в нанесении на керамическую подложку специальных проводниковых, резистивных или диэлектрических паст путем продавливания их через сетчатый трафарет с помощью ракеля и в последующей термообработке (вжигании) этих паст, в результате чего образуется прочная монолитная структура.

Проводниковые и резистивные пасты состоят из порошков металлов и их окислов, а также содержат порошки низкоплавких стекол (стеклянную фритту). В диэлектрических пастах металлические порошки отсутствуют. Для придания пастам необходимой вязкости, их замешивают на органических связующих веществах (этилцеллюлоза, вазелины).

При вжигании паст стеклянная фритта размягчается, обволакивает и затем при охлаждении связывает проводящие частицы проводниковых и резистивных паст. Диэлектрические пасты после термообработки представляют однородные стекловидные пленки.

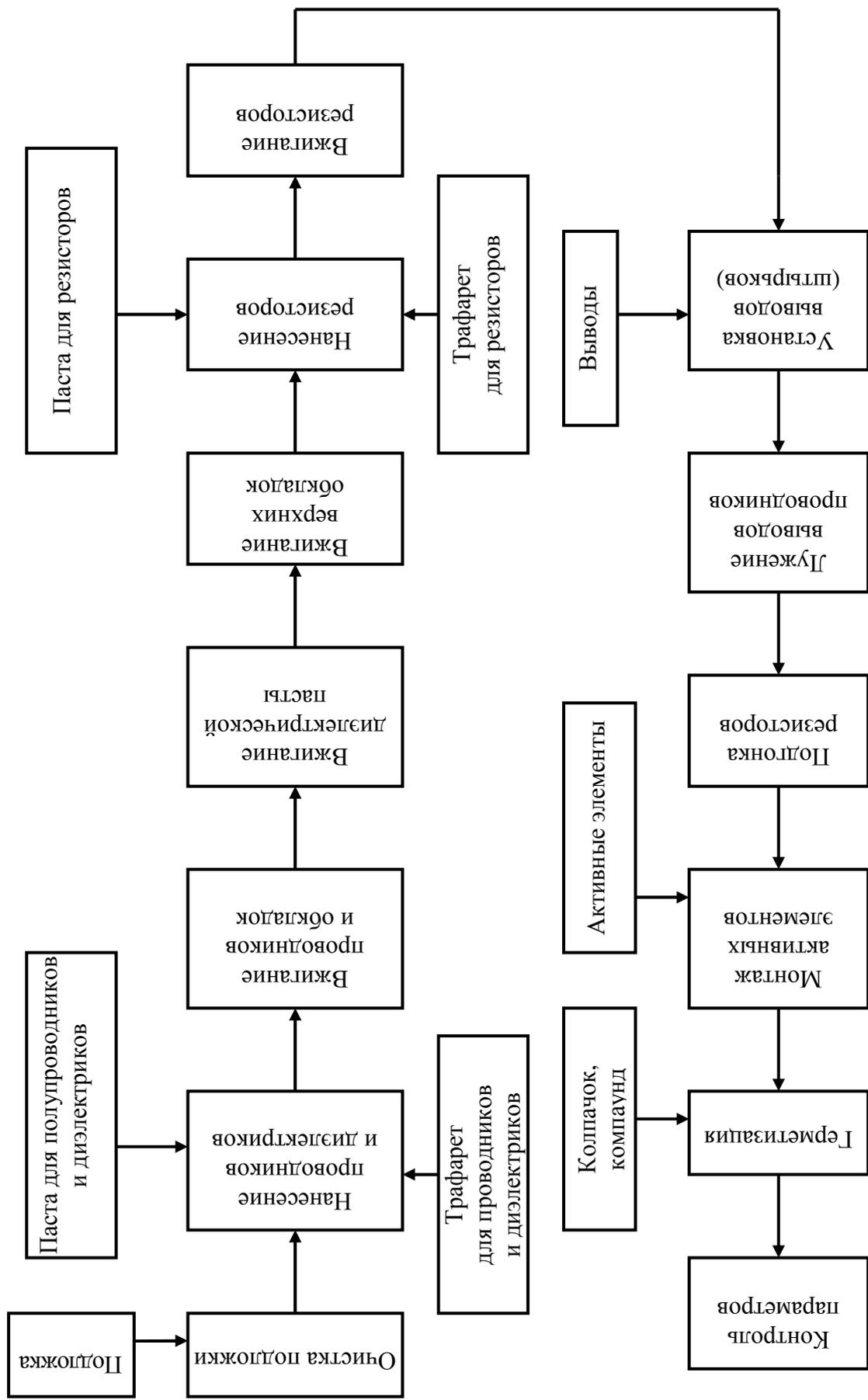


Рис. 4.1. Схема технологического процесса изготовления толстопленочных ГИМС

#### 4.1.2. Исходные материалы для пленок: проводников, резисторов и диэлектриков

*Проводниковые* пасты изготавливаются на основе золота, золота – платины, золота – палладия, палладия – серебра, индия, рения.

Толщина слоя проводника на основе композиции палладий - серебро составляет 10 - 25 мкм. Минимальная ширина (длина) проводника колеблется в пределах 0,15 - 0,20 мм при нанесении пасты на керамику и 0,20 - 0,30 мм при нанесении на слой диэлектрика. Минимальное расстояние между проводниковыми элементами 0,05 - 0,20 мм в зависимости от рецептурного состава пасты. Сопротивление квадрата проводниковой пленки на основе данной композиции колеблется в пределах 0,05 - 0,5 Ом/□.

Характеристики проводящих, резистивных и диэлектрических паст приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

**Характеристики проводящих паст**

Обозначение пасты	Толщина слоя, мкм	Поверхностное удельное сопротивление $\rho_s$ , Ом/□, не более	Область применения
ПП-1	10 – 20	0,05	Для изготовления проводников, нижних обкладок конденсаторов и контактных площадок первого слоя с размерами сторон элементов не менее 0,2 мм
ПП-2	15 – 20	5,0	Для изготовления верхних обкладок конденсаторов, не смачиваемых припоем
ПП-3	15 – 25	0,05	Для изготовления проводников, нижних обкладок конденсаторов и контактных площадок под монтаж навесных компонентов с жесткими выводами
ПП-4	15 – 25	0,05	Для изготовления проводящих элементов, наносимых на слой диэлектрика

*Резистивные* пасты обычно изготавливаются на основе композиций: серебро – палладий – окись палладия, серебро - окись рутения, висмут – рутений, рутений – иридий, платина – окись иридия. Опробованы также композиции типа кадмий - алюминий – бор - окись молибдена. Толщина резистивных пленок после вжигания составляет примерно 20 мкм.

Резистивные пасты, приготавливаемые на основе композиции палладий – серебро, обеспечивают номинальные сопротивления резисторов от

25 Ом до 1 МОм. Сопротивление квадрата резистивной пленки соответствует следующему ряду значений: 5, 100, 500, 1000, 3000, 6000, 20 000, 50 000 Ом/□. Температурный коэффициент сопротивления подобных паст не превышает  $800 \cdot 10^{-6}$  1/град в интервале температур – 60... + 125 °С.

*Диэлектрические* пленки в толсто пленочных микросхемах применяются в качестве диэлектриков конденсаторов, межслойной изоляции, защитных слоев.

Диэлектрические пасты для конденсаторов изготавливаются на основе смеси керамических материалов и флюсов. Толщина пленки после термической обработки составляет 40 – 60 мкм.

Используя пленки, обеспечивающие удельную емкость  $C_0 = 3700$  пФ/см<sup>2</sup>, изготавливают конденсаторы с номинальной емкостью от 500 до 300 пФ. Пленки с  $C_0 = 10\,000$  пФ/см<sup>2</sup> позволяют производить конденсаторы в диапазоне от 100 до 2500 пФ. Погрешность номинальной емкости конденсаторов обычно составляет  $\pm 15\%$ . Пробивное напряжение не менее 150 В.

Величина диэлектрической проницаемости для диэлектрических паст конденсаторов на основе композиции титанат бария – окись титана – окись алюминия – легкоплавкое стекло составляет от 10 до 2000.

#### **4.1.3. Материалы подложек и подготовка поверхности**

Для обеспечения заданных электрических параметров микросхем материал подложки должен обладать:

- высоким коэффициентом теплопроводности для эффективной передачи тепла от тепловыделяющих элементов (резисторов, диодов, транзисторов) к корпусу;
- высокой механической прочностью, обеспечивающей целостность подложки с нанесенными элементами как в процессе изготовления микросхемы (разделение на платы, термокомпрессия, пайка, установка платы в корпус и т. д.), так и при ее эксплуатации в условиях термоциклирования, термоударов и механических воздействий;
- высокой химической инертностью к осаждаемым материалам для снижения временной нестабильности параметров пленочных элементов, обусловленной физико-химическими процессами на границе раздела пленка-подложка и проникновением ионов из подложки в пленку;
- стойкостью к воздействию высокой температуры в процессах формирования элементов и установки навесных компонентов;
- стойкостью к воздействию химических реактивов в процессе подготовки поверхности подложки перед нанесением пленок, при электрохимических обработках и химическом осаждении пленок;

- способностью к хорошей механической обработке (полировке, резке).

Для изготовления подложек обычно используются керамические материалы или стекла. Чаще всего употребляется керамика на основе 96%-ной поликристаллической окиси алюминия. Для мощных ИМС применяется также бериллиевая керамика, обладающая хорошей теплопроводностью, но требующая особых мер обеспечения безопасности при обработке вследствие ее токсичности.

Точность получаемого в процессе трафаретной печати рисунка микросхемы в значительной степени зависит от плоскостности поверхности подложки и ее шероховатости. Максимальная кривизна поверхности (макронеровность) не должна превышать 4 мкм на 1 мм длины. Шероховатость (микронеровность) рабочей поверхности подложки должна быть не ниже восьмого класса ( $Ra = 0,32 - 0,63$  мкм). Слишком малая шероховатость может приводить к ухудшению адгезии наносимых пленок. Большая шероховатость поверхности подложки снижает надежность тонкопленочных резисторов и конденсаторов, так как при наличии микронеровностей толщина резистивных и диэлектрических пленок становится неравномерной.

Размеры плат определяются конкретной конструкцией применяемых корпусов ИМС. Рекомендуются размеры  $8 \times 15$  мм<sup>2</sup>,  $10 \times 16$  мм<sup>2</sup> и кратные им.

#### **4.1.4. Особенности получения рабочих рисунков из паст**

Нанесение паст можно производить двумя способами: бесконтактным и контактным.

При *бесконтактном* способе подложку, на которую нужно нанести пасту, устанавливают под сетчатым трафаретом с некоторым зазором. Пасту подают поверх трафарета и передвижением ракеля через отверстия в трафарете переносят на подложку в виде столбиков, копирующих отверстия в сетке (см. рис. 3.4). Растекаясь, столбики соединяются, образуя такой же рисунок, как на трафарете. Сетчатые трафареты изготавливают из капрона, нейлона или нержавеющей стали.

Качество трафаретной печати зависит от скорости перемещения и давления ракеля, зазора между сетчатым трафаретом и платой, натяжения трафарета и свойств пасты. Необходимо строго соблюдать параллельность платы, трафарета и направления движения ракеля.

Для устранения неравномерности толщины резисторов рекомендуется составлять топологию так, чтобы все резисторы располагались по длине

в одном направлении по движению ракеля. По этой же причине не рекомендуется проектировать длинные и узкие, а также короткие и широкие резисторы.

При *контактном* способе трафаретной печати плату устанавливают под трафаретом без зазора. Отделение платы от трафарета осуществляют вертикальным перемещением без скольжения во избежание размазывания отпечатка пасты. При контактном способе пасту можно наносить пульверизацией с помощью распылителя. Точность отпечатка при контактном способе выше, чем при бесконтактном.

#### **4.1.5. Процесс сушки и вжигания**

Пасты после нанесения подвергают термообработке – сушке и вжиганию. Сушка необходима для удаления из пасты летучих компонентов (растворителя). Сушку проводят при температуре 80 – 150 °С в течение 10 - 15 мин в установках с инфракрасным (ИК) нагревом. ИК - излучение проникает в глубь слоя пасты на всю его толщину, обеспечивая равномерную сушку без образования корочки на поверхности.

Вжигание производят в печах конвейерного типа непрерывного действия с постепенным повышением температуры до максимальной, выдержкой при ней и последующим охлаждением. Ряд печей содержит приставки ИК – сушки, что позволяет объединить эти операции.

Вначале при термообработке происходит выгорание органической связи (температура 300 – 400 °С, при этом скорость нагрева во избежание образования пузырьков не должна превышать 20 град/мин). Во второй, центральной температурной зоне конвейерной печи происходит сплавление частиц основных материалов между собой с образованием проводящих мостиков и спекание их со стеклом и керамической платой при температуре 500 – 1000 °С. На выходе из печи платы охлаждают с небольшой скоростью во избежание их растрескивания и отслаивания пленок от плат.

Перед первым нанесением паст платы подвергают очистке и термическому отжигу при температуре 600 - 620 °С. Пасты для создания проводящих слоев вжигают при температуре 750 - 800 °С. Пасты диэлектрика конденсаторов и изоляционный слой - при 700 - 750 °С, верхние обкладки конденсаторов - при 700 - 720 °С, диэлектрик защитного слоя – при 620 – 650 °С, резисторы - при 600 - 650 °С. Для исключения появления сквозных пор в диэлектрике конденсаторов его наносят в два слоя, причем каждый слой сушат и сжигают отдельно.

Последовательность технологических операций нанесения и термообработки паст при производстве толсто пленочной ГИС следует выбирать такой, чтобы каждая последующая операция имела более низкую температуру вжигания по сравнению с предыдущей. Последними наносят и вжигают резистивные пасты. Возможны такие варианты:

1. для схем с однослойной разводкой, содержащих проводники, конденсаторы и резисторы, – формирование проводников, контактных площадок и нижних обкладок конденсаторов; формирование слоя диэлектрика; формирование верхних обкладок конденсаторов; формирование резисторов;

2. для схем с двухслойной разводкой, содержащих проводники и резисторы, – формирование проводников; нанесение межслойной изоляции с отверстиями для контактных переходов; формирование второго слоя проводников; формирование резисторов;

3. для схем с трехслойной разводкой, содержащих проводники и резисторы, – формирование проводников, шин питания и внешних контактных площадок, нанесение диэлектрика межслойной изоляции с окнами для контактов; формирование второго слоя проводников и контактов к первому слою; нанесение еще одного слоя изоляции; формирование верхнего слоя проводников; формирование защитного диэлектрика; формирование резистивных слоев.

#### **4.1.6. Основные технологические процессы изготовления полупроводниковых интегральных микросхем**

Полупроводниковая ИМС имеет элементы, сформированные в объеме полупроводниковой пластины и на ее поверхности. В связи с этим полупроводниковая подложка должна обладать совершенно определенными электрофизическими и механическими свойствами, например, минимальную концентрацию примесей, в том числе и в виде дефектов кристаллической структуры типа дислокаций, вакансий и т.д. Для изготовления полупроводниковых ИМС применяют пластины из монокристаллического кремния, германия, арсенида галлия. Чаще всего используется кремний благодаря большой ширине запрещенной зоны. Германий и арсенид галлия имеют значительно большую подвижность носителей и поэтому применяются главным образом для создания СВЧ-приборов.

Для получения в полупроводнике областей с заданной концентрацией примесей применяют различные способы, такие, как легирование из расплава, сплавление, диффузия, эпитаксия, ионное легирование.

Наиболее широко в массовом производстве применяется *диффузия* – процесс переноса вещества из области с большей концентрацией в область с меньшей концентрацией.

На рис. 4.2 показан профиль концентрации распределения примесей для *p-n-p*-структуры, полученной методом диффузии.

Глубина *p-n*-перехода определяется как расстояние от поверхности пластины до плоскости, на которой концентрация донорной примеси равна концентрации акцепторной примеси. Максимальная концентрация примеси, которая может быть достигнута при данной температуре, является свойством пары легирующий элемент – твердое тело и определяется их растворимостью. Если профиль заданной концентрации в твердом теле требует поверхностной концентрации примеси, превышающей ее растворимость в твердой фазе при температуре диффузии, то такой элемент нельзя использовать в качестве диффузанта.

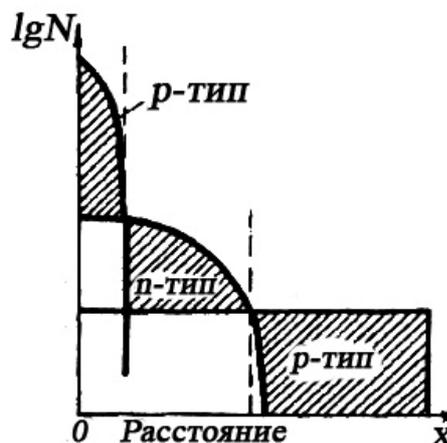


Рис. 4.2. Профиль концентраций для диффузионных *p-n-p*-структур

Диффузионные процессы проводятся при температуре 1273...1573 К по следующей схеме:

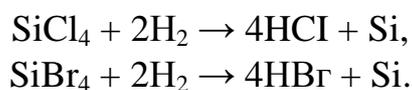
1. определение и регистрация исходных параметров полупроводникового материала;
2. установление требуемых параметров диффузионного слоя;
3. определение времени и температуры диффузии;
4. проверка и вывод параметров диффузионной печи на рабочий режим;
5. обработка пластин;
6. загрузка пластин в печь, диффузия, выгрузка;
7. регистрация глубины диффузии и удельного поверхностного сопротивления полученного слоя.

*Эпитаксия* служит для получения полупроводниковых структур с заданной концентрацией примеси путем послойного наращивания на полупроводниковой или диэлектрической подложке. Эпитаксия (от греч. *epi* – на, *taxis* – расположение, порядок) – это процесс ориентированного осаждения

вещества на монокристаллическую подложку, при котором полученная пленка является продолжением структуры основания. Практическое значение имеют осажденные эпитаксиальные слои на полупроводниковых пластинах противоположного типа проводимости, причем на границе раздела пленка-пластина образуется *p-n*-переход.

При эпитаксиальном процессе атомы примеси вводят в полупроводник во время осаждения эпитаксиальной пленки. Отношение числа атомов примеси к числу атомов кремния можно легко регулировать в газовой фазе и получать пленки с заданной концентрацией примесей. Изменяя содержание примеси в газовой фазе или ее тип, можно изменять характеристики эпитаксиальной пленки и создавать резкие *p-n*-переходы без необходимости компенсации примесей противоположного знака.

Наибольшее распространение в промышленности получили процессы эпитаксии полупроводников из газовой фазы с помощью химических реакций. Для выделения кремния используют реакции двух типов: восстановление и пиролитическое разложение. Восстановление проводят из тетрахлорида кремния  $\text{SiCl}_4$ , тетрабромид кремния  $\text{SiBr}_4$ , трихлорсилана  $\text{SiHCl}_3$ . При использовании двух первых соединений восстановление идет по следующим реакциям:



Для пиролитического разложения применяют силан:



Одновременно с осаждением кремния осаждают примеси (бор или фосфор) из газообразных соединений  $\text{BCl}_2$ ,  $\text{BBr}_2$ ,  $\text{PCl}_4$  (в реакциях восстановления), диборан  $\text{B}_2\text{H}_4$  и фосфин  $\text{PH}_3$  (в реакциях пиролиза). Соотношение компонентов смеси должно обеспечивать заданную концентрацию примеси в эпитаксиальной пленке.

*Ионное легирование (ионная имплантация)* – это введение атомов в приповерхностный слой твердого тела путем бомбардировки ионами с энергией от нескольких килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт.

Получение *p-n*-переходов ионным легированием обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с методом диффузии: сравнительно низкая температура обработки полупроводниковых пластин, точный контроль глубины и профиля распределения примесей, гибкость и универсальность, возможность полной автоматизации процесса.

Важным отличием ионного легирования от диффузии является то, что содержание внедренных атомов примеси определяется внешней системой и не ограничено растворимостью диффузанта в материале подложки. Внедряя ионы групп III и V в кремниевую пластину, можно получать *p-n*-переходы и *n-p*-переходы с достаточно широким диапазоном параметров.

При диффузии поверхностная концентрация и профиль распределения примеси определяются температурой процесса, а при ионном легировании эти два параметра можно изменять независимо друг от друга. Профиль определяется энергией ионов, а концентрация – дозой облучения.

Методом ионного легирования диодные структуры получают следующим образом. На кремниевых пластинах выращивают окисную пленку, которая после проведения фотолитографии служит маской для получения облученных участков нужной конфигурации. Зная требуемые параметры *p-n*-переходов, определяют энергию ионного пучка и дозу облучения, после чего проводят облучение при определенном ускоряющем напряжении, токе пучка и времени облучения. Для стабилизации структуры и уменьшения дефектов после ионной имплантации осуществляют высокотемпературный отжиг.

Транзисторные структуры, полученные ионным легированием, имеют лучшие характеристики, особенно при изготовлении СВЧ-приборов. Этот метод позволяет изготавливать области базы очень малой глубины ( $h < 0,1$  мкм) с высокой концентрацией примесей и, следовательно, с малым сопротивлением по всей толщине базы, что позволяет улучшать предельную частоту усиления транзистора.

На рис 4.3 представлены профили концентрации в транзисторных структурах, изготовленных ионной имплантацией и диффузией.

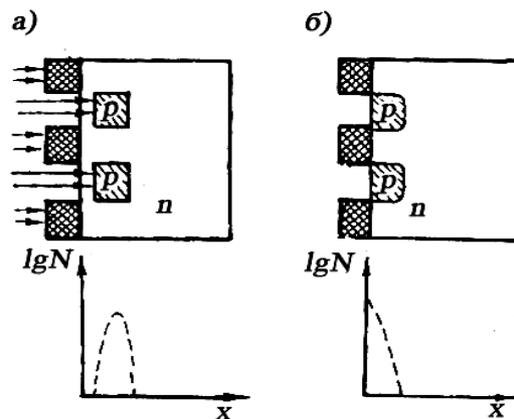


Рис. 4.3. Механизм образования и профили концентраций в транзисторных структурах:

*a* – изготовленных имплантацией ионов бора, *б* – диффузией

**Методы электрической изоляции элементов полупроводниковых ИС.** Одним из основных требований, которое должно быть удовлетворено при производстве полупроводниковой ИМС, является сведение к минимуму паразитных связей между элементами. Его можно выполнять путем создания локальных хорошо изолированных друг от друга областей полупроводника.

Основные методы электрической изоляции элементов ИМС можно разделить на два класса: методы изоляции диффузионными областями и диэлектрическими областями (рис. 4.4, 4.5). Применяют также комбинированные методы изоляции.

К достоинствам методов изоляции диффузионными областями относятся высокая плотность размещения элементов схемы, сравнительная простота технологии, достаточно высокий процент выхода годных. Основным недостатком метода изоляции диффузионными областями: большая площадь изолирующей области. Наибольшее распространение благодаря простоте и технологичности нашел *метод изоляции обратносмещенным  $p$ - $n$ -переходом* (рис. 4.4).

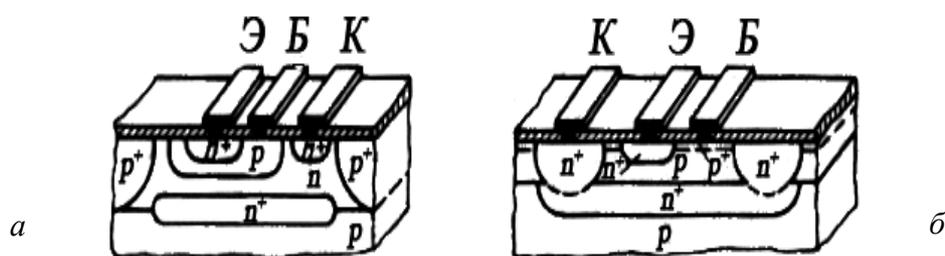


Рис. 4.4. Конструкция интегрального биполярного транзистора с изоляцией обратносмещенным  $p$ - $n$ -переходом: *а* – изготовленного по планарно-эпитаксиальной технологии, *б* – по технологии коллекторной изолирующей диффузии

Для *диэлектрической изоляции* (рис. 4.5) используют пленки диоксида кремния, алюминия и нитрида кремния. Наиболее часто используют: эпоксид-метод, VIP-процесс, структуру кремний в диэлектрике, кремний на диэлектрике.

Основной недостаток конструкций с диэлектрической изоляцией элементов: сложный техпроцесс, малый выход годных микросхем, плохой отвод тепла от элементов микросхемы в подложку, трудность создания разводки, высокая плотность дефектов структуры в изолированных островках кремния и низкая воспроизводимость параметров элементов микросхем.

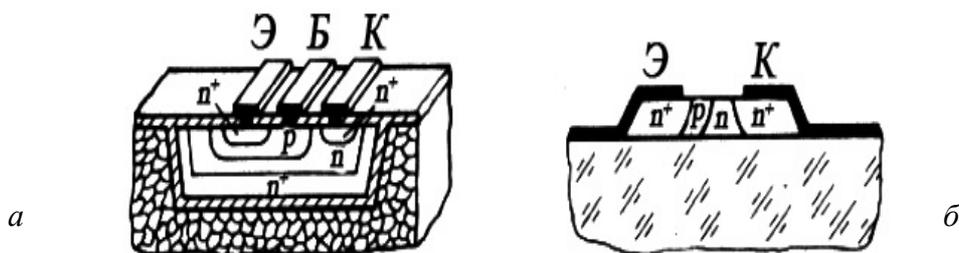


Рис. 4.5. Конструкция интегрального транзистора с изоляцией диэлектриком: *а* – структура кремний в диэлектрике (КВД), *б* – структура кремний на диэлектрике (КНД) со сформированном транзистором с вертикальными *p-n*-переходами

Комбинированная изоляция (рис. 4.6) сочетает технологичность изоляции *p-n*-переходом и высокие качества диэлектрической изоляции: элементы микросхемы со стороны подложки изолированы обратнo-смещенным *p-n*-переходами, а с боковых сторон – диэлектриком (оксидом, стеклом, керамикой, поликремнием и т. д.).

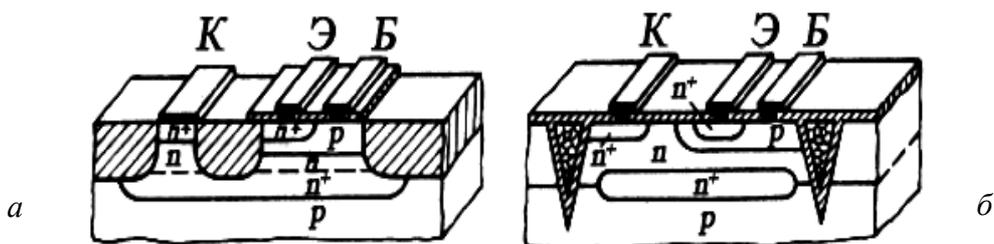


Рис. 4.6. Конструкция интегральных транзисторов с комбинированной изоляцией: *а* – полученных локальным окислением кремния, *б* – анизотропным травлением кремния с последующим окислением профилированной поверхности и заполнением окисленных канавок поликристаллическим кремнием

Конкретный метод изоляции элементов ИМС выбирается в зависимости от требований к схеме, а именно: плотности размещения элементов, частотного диапазона ее работы, рассеиваемой мощности и т.д.

## Тема 4.2 ТОНКОПЛЕНОЧНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

### 4.2.1. Физико-химические процессы тонкопленочных ИС

Для понимания физических явлений, происходящих при нанесении тонких пленок в вакууме, необходимо знать, что процесс роста пленки на

подложке состоит из двух этапов: начального и завершающего. Рассмотрим, как взаимодействуют наносимые частицы в вакуумном пространстве и на подложке (рис. 4.7).

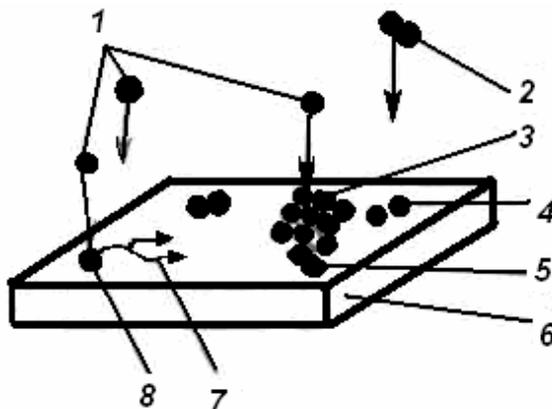


Рис. 4.7. **Взаимодействие осаждаемых частиц с подложкой:** 1 – частицы в вакуумном пространстве, 2 – диплет частиц в вакуумном пространстве, 3 – центр кристаллизации, 4 – адсорбированный диплет частиц, 5 – рост кристаллита за счет мигрирующих частиц, 6 – подложка, 7 – поверхностная миграция частиц, 8 – адсорбированная частица

Покинувшие поверхность источника частицы 1 вещества движутся через вакуумное (разреженное) пространство с большими скоростями (порядка сотен и даже тысяч метров в секунду) к подложке 6 и достигают ее поверхности, отдавая ей при столкновении часть своей энергии (например, частица 8). Доля передаваемой энергии тем меньше, чем выше температура подложки. Сохранив при этом некоторый избыток энергии, частица 8 вещества способна перемещаться (мигрировать) по поверхности подложки, как это показано ломаными стрелками 7.

При миграции по поверхности частица постепенно теряет избыток своей энергии, стремясь к тепловому равновесию с подложкой, и при этом может произойти следующее. Если на пути движения частица потеряет избыток, своей энергии, она фиксируется на подложке (конденсируется). Встретив же на пути движения другую мигрирующую частицу (или группу частиц), она вступит с ней в сильную связь (металлическую), создав адсорбированный диплет 4. При достаточно крупном объединении такие частицы полностью теряют способность мигрировать и фиксируются на подложке, становясь центром кристаллизации 3.

Вокруг отдельных центров кристаллизации происходит рост кристаллитов, которые впоследствии срастаются и образуют сплошную пленку. Рост кристаллитов происходит как за счет мигрирующих по поверхно-

сти частиц 5, так и в результате непосредственного осаждения частиц 1 на поверхность кристаллитов. Возможно также образование дуплетов 2 в вакуумном пространстве при столкновении двух частиц, которые в конечном итоге адсорбируются на подложке.

#### **4.2.2. Особенности технологического процесса создания тонкопленочных элементов**

Процесс нанесения тонких пленок в вакууме состоит в создании (генерации) потока частиц, направленного в сторону обрабатываемой подложки, и последующей их конденсации с образованием тонкопленочных слоев на покрываемой поверхности (для краткости назовем частицами отдельные атомы или молекулы вещества или газа).

При нанесении тонких пленок одновременно протекают три основных процесса: генерация направленного потока частиц осаждаемого вещества; пролет частиц в разреженном (вакуумном) пространстве от их источника к обрабатываемой поверхности; осаждение (конденсация) частиц на поверхности с образованием тонкопленочных слоев.

В соответствии с этим вакуумные установки для нанесения тонких пленок, несмотря на многообразие их назначения и конструктивного оформления, состоят из следующих основных элементов: источника генерации потока частиц осаждаемого материала; вакуумной системы, обеспечивающей требуемые условия для проведения технологического процесса; транспортно-позиционирующих устройств, обеспечивающих ввод подложек в зону нанесения пленок и ориентирование обрабатываемых поверхностей относительно потока частиц наносимого материала.

#### **4.2.3. Способы получения тонких пленок**

При нанесении тонких пленок используют два метода генерации потока частиц в вакууме: термическое испарение и ионное распыление.

Метод *термического испарения* основан на нагреве веществ в специальных испарителях до температуры, при которой начинается заметный процесс испарения, и последующей конденсации паров вещества в виде тонких пленок на обрабатываемых поверхностях, расположенных на некотором расстоянии от испарителя. Процесс проводится в замкнутой камере при сниженном давлении газа в ней. Важным фактором, определяющим эксплуатационные особенности и конструкцию установок термического испарения, является

ся способ нагрева испаряемых материалов: резистивный (омический) или электронно-лучевой. Схема установки приведена на рис. 4.8.

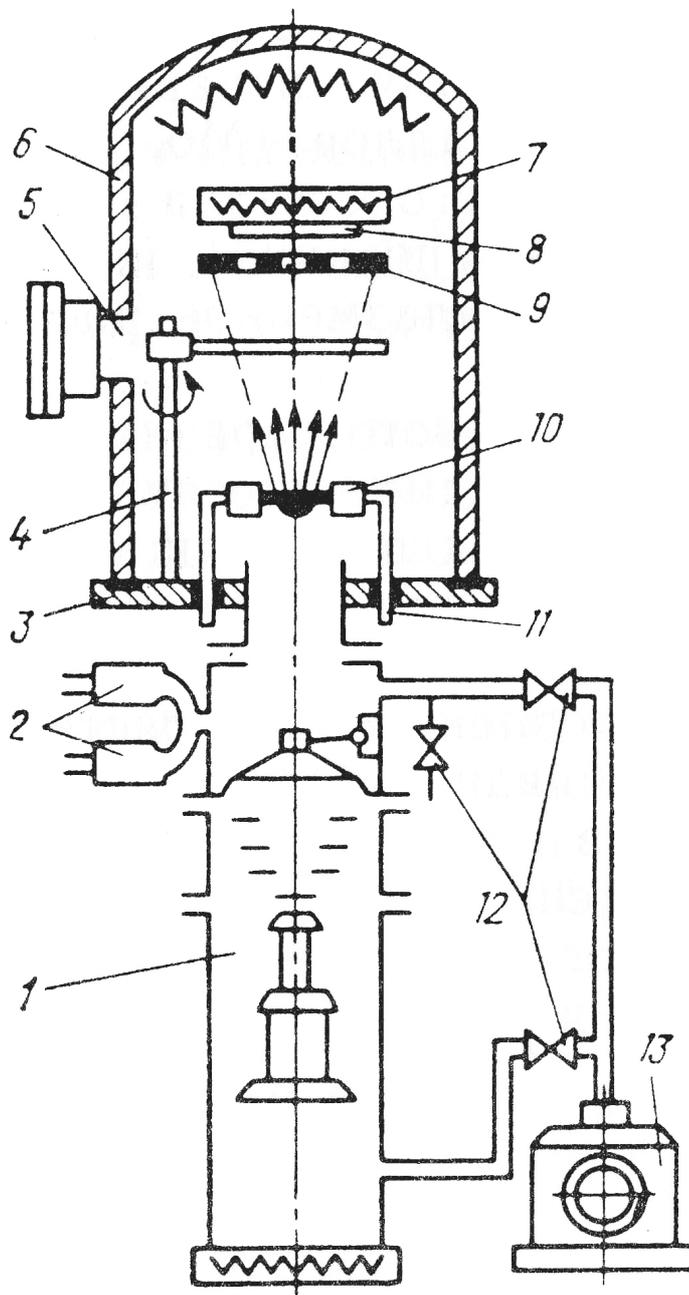


Рис. 4.8. Схема устройства для получения пленок испарением и конденсацией термовакuumным методом: 1 – паромасляный насос, 2 – манометры, 3 – плита, 4 – заслонка, 5 – смотровое окно, 6 – колпак, 7 – нагреватель подложек, 8 – подложки, 9 – маска, 10 – испаритель, 11 – электроводы, 12 – вентили, 13 – вакуумный насос

Метод *ионно-плазменного распыления* основан на бомбардировке мишени, изготовленной из осаждаемого материала, быстрыми частицами (обычно положительными ионами аргона). Выбитые из мишени в резуль-

тате бомбардировки частицы образуют поток наносимого материала, который осаждается в виде тонкой пленки на подложках, расположенных на некотором расстоянии от мишени. В промышленной практике встречаются диодные, триодные и многоэлектродные системы распыления.

Выбор того или иного метода нанесения пленки зависит от многих факторов, основным из которых являются природа и сортament используемого материала, вид и состояние обрабатываемых поверхностей, требования к чистоте и толщине пленки, производительность процесса.

#### **4.2.4. Требования, предъявляемые к материалам и качеству поверхности подложки**

Подложка в конструкции гибридной интегральной микросхемы является основанием, на котором располагаются пленочные элементы и навесные компоненты. От ее свойств во многом зависит качество всей конструкции.

Подложки, используемые при изготовлении гибридных интегральных микросхем, должны удовлетворять следующим *требованиям*: иметь значительную механическую прочность при небольших толщинах; обладать высоким удельным электрическим сопротивлением и малыми потерями на высоких частотах ( $\text{tg } \delta$ ) и при высокой температуре; быть химически инертными к осаждаемым веществам; не иметь газовыделений в вакууме; сохранять физическую и химическую стойкость при нагревании до 400 – 500 °С; иметь температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), близкий к ТКЛР осаждаемых пленок; способствовать обеспечению высокой адгезии осаждаемых пленок; иметь гладкую поверхность ( $R_z \leq 0,1$  мкм на длине 0,08 мм); обладать высокой электрической прочностью; иметь низкую стоимость.

Наиболее широкое применение при создании тонкопленочных гибридных ИМС находят подложки из ситалла СТ50-1, стекла С48-3, «Поликора» и бериллиевой керамики. Промышленностью выпускаются подложки различных типоразмеров. Однако в качестве базовых преимущественно используются подложки размером 100×100 и 50×50 мм из стекла и 48×60 мм - из ситалла и керамики. По толщине наибольшее распространение получили подложки размером 0,6; 1 и 1,6 мм. В технически обоснованных случаях применяют и более тонкие подложки до 0,2 мм.

Многослойные керамические подложки (рис. 4.9) формируются из нескольких слоев необожженной алюмооксидной керамики толщиной

примерно 100 мкм, на поверхность которых последовательно наносят пасту для коммутационных проводников. После опрессовки и обжига многослойного пакета образуется монолитная структура, внутри и на поверхности которой расположены коммутационные проводники. Межслойные соединения формируются через сквозные отверстия в керамических слоях при заполнении проводящей пастой в процессе получения коммутационных проводников слоя.

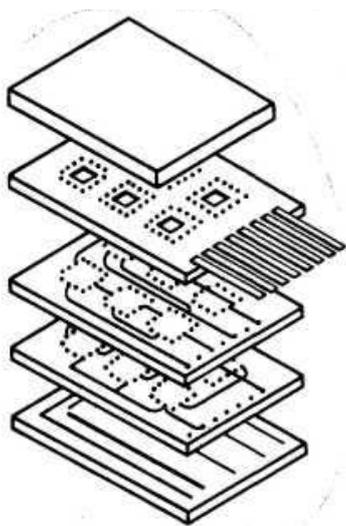


Рис. 4.9. Конструкция многослойной коммутационной керамической платы: набор слоев керамики в многоуровневой керамической плате

#### 4.2.5. Основные свойства тонких металлических пленок

Металлические пленки в гибридных интегральных схемах применяют в качестве проводников, контактных площадок, адгезионного подслоя, защитного слоя.

Электрофизические свойства проводников и контактных площадок в значительной степени определяются свойствами применяемых материалов, к которым предъявляется ряд требований: низкое удельное сопротивление; хорошая адгезия к подложке; высокая антикоррозийная стойкость; обеспечение низкого и воспроизводимого переходного сопротивления контакта; возможность присоединения (пайки или сварки) выводов навесных компонентов и проволочных перемычек, совместимость технологии нанесения проводников и контактных площадок с технологией изготовления других элементов микросхем.

Проводники и контактные площадки в гибридных ИМС чаще всего выполняют многослойными. При этом для изготовления проводящего слоя наиболее широко используют следующие материалы: алюминий А99 ГОСТ 11069-74; тантал ТВЧ ТУ 95.311-75; медь вакуумной плавки МВ ТУ 11 Яе 0.021.040-72; золото Зл. 999,9 ГОСТ 6835-72.

Для улучшения адгезии токопроводящих материалов к подложке напыляют подслои. В качестве материала подслоя используют: хром ЭРХ ЧМТУ 5-30-70; нихром (проволока) Х20Н80 ГОСТ 12766 - 67; ванадий ТУ 48-4-373-76.

В качестве защиты проводников и контактных площадок от внешних воздействий применяют: ванадий ТУ 48-4-373-76; никель ГОСТ 849-70; хром ЭРХ ЧМТУ 5-30-70; оловосодержащие сплавы.

В технически обоснованных случаях для защиты используют золото Зл 3 ГОСТ 9791-68 или золото Зл 999,9 ГОСТ 6835-72.

Самым распространенным материалом тонкопленочных проводников и контактных площадок в гибридных микросхемах повышенной надежности является золото с подслоем хрома, нихрома или титана. Подслой обеспечивает высокую адгезию, а золото – нужную проводимость, высокую коррозионную стойкость, возможность пайки и сварки. Толщина пленочных проводников обычно составляет 0,5...1 мкм. В аппаратуре с менее жесткими требованиями к надежности в качестве проводников используют пленки меди или алюминия с подслоем хрома, нихрома или титана. Для предотвращения окисления меди и улучшения условий пайки или сварки ее покрывают никелем, золотом или серебром.

Алюминий обладает достаточно высокой коррозионной стойкостью и может использоваться как с защитным покрытием никеля для обеспечения возможности пайки, так и без него, если присоединение навесных компонентов и внешних контактов осуществляется сваркой. Толщина медных и алюминиевых проводников приблизительно равна 1 мкм, а толщина никелевого или золотого покрытия обычно составляет десятые - сотые доли микрометра

#### **4.2.6. Основные свойства изоляционных пленок**

Материалы, применяемые для изготовления диэлектрических слоев, должны удовлетворять следующим требованиям: иметь высокое значение диэлектрической проницаемости; минимальный температурный коэффициент емкости (ТКЕ); минимальные потери энергии на высокой частоте ( $\text{tg } \delta$ ); обладать высокой влагостойкостью и теплостойкостью; обеспечивать напыление плотных и однородных пленок; иметь хорошую адгезию как к подложке, так и к материалам обкладок; обладать высокой электрической прочностью.

Электрофизические характеристики материалов, применяемых для изготовления диэлектрических слоев, приведены в табл. 4.2

Таблица 4.2

**Электрические характеристики диэлектрических материалов  
для пленочных конденсаторов**

Материал диэлектрика	Удельная емкость, пФ/мм	Электрическая прочность, МВ/см	$\epsilon$ на частоте 1 кГц	$\text{tg}\delta$ на частоте 1 МГц	ТКЕ $10^{-4}$ 1/град (в интервале температур от -60 до +85 °С)	Рабочая частота, МГц
Моноокись кремния БКО.028.004 ТУ	50 – 100	2 – 3	5 - 6	0,01 – 0,02	2	<500
Моноокись германия ЕТО.021.014 ТУ	50 – 150	1	11 - 12	0,005 – 0,007	3	–
Трехсернистая сурьма МРТУ6-09-2858-66	100 – 150	0,3 - 0,5	18 - 21	0,004 - 0,01	5	–
Халькогенидное стекло ХГ-44 РМО.1096- 1	100 – 150	2,2 – 2,8	9 - 10	0,004 – 0,02	28	–
Халькогеиндное стекло ИКС-24 РМО.1096-61	100	0,4	5 – 6	0,02	5 - 9	–
Боросиликатное стекло ЕТО.035.015ТУ	25 - 150	3 – 4	4	0,001 - 0,0015	0,35	< 300
Стекло электроваку- умное С41-1 НПО. 027.600	150 – 400	3 – 4	5,2	0,002 – 0,003	0,5 – 1,8	< 300
Пятиокись тантала ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ )	600 – 2000	2	23	0,02	4	< 01
Окись алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	300 - 850	9	10	0,003 - 0,015	1,5 - 5	–

### Тема 4.3

## ПЛЕНОЧНЫЕ РЕЗИСТОРЫ

### 4.3.1. Конструирование пленочных резисторов

На начальном этапе конструирования тонкопленочных резисторов выбирают их форму и производят расчет геометрических размеров.

Форма резистора определяется его номиналом  $R$ , сопротивлением квадрата резистивной пленки  $\rho_{кв}$  точностью  $\gamma_R$ , предъявляемой к изготов-

лению, площадью на плате, отведенной под резистор, и технологическим процессом изготовления. Наиболее распространенные конфигурации тонкопленочных резисторов показаны на рис. 4.10.

На практике самое широкое применение находят резисторы прямоугольной формы (рис. 4.10, *a*). Это обусловлено в первую очередь простотой их конструкции, а также тем, что в подобных резисторах потенциальное поле однородно, отсутствуют локальные перегрузки, компенсируются погрешности совмещения масок или фотошаблонов. Если расчетная длина резистора превышает длину отведенной под него области, то резистор компонуют в виде отдельных резистивных пленок, соединенных проводящими перемычками (рис. 4.10, *в*, *д*, *е*), или изгибают таким образом, как показано на рис. 4.10, *б*, *г*. Следует отметить, что резисторы, приведенные на рис. 4.10, *в*, отличаются более высокой точностью по сравнению с резисторами, представленными на рис. 4.10, *б*, *г*, однако занимают большую площадь.

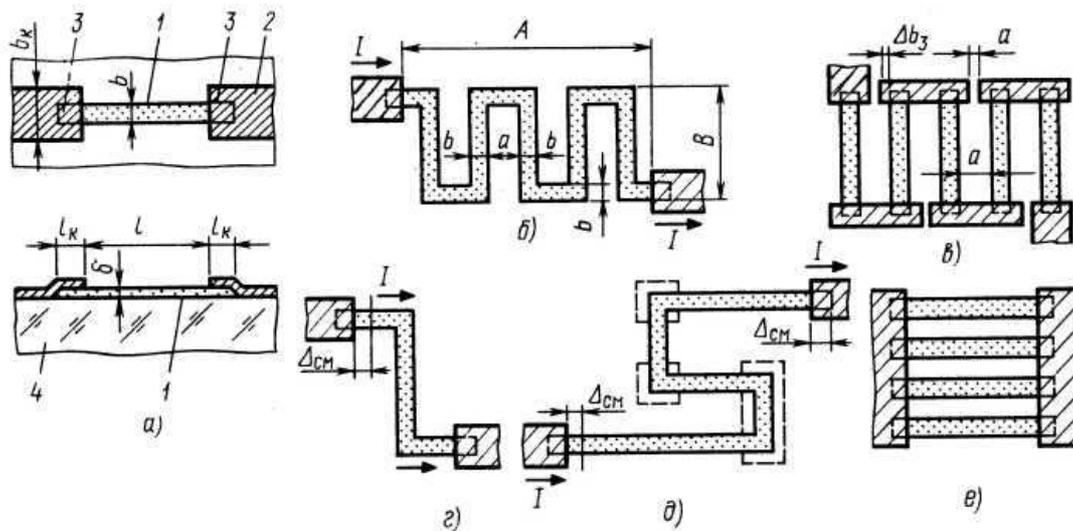


Рис. 4.10. Конструкция полоскового резистора (*a*) и конфигурации пленочных резисторов сложной формы: типа меандр (*б*), составных (*в*, *д*, *е*), Z-образного (*г*): 1 – тело резистора, 2 – пленочный проводник, 3 – области контактов резистивной пленки с пленочными проводниками, 4 – диэлектрическая подложка

Для определения геометрических размеров резисторов необходимо располагать следующими исходными данными: номинальным значением сопротивления  $R$  (Ом); сопротивлением квадрата резистивной пленки  $\rho_{кв}$  (Ом/□); относительной погрешностью сопротивления резистора  $\gamma_R$  (%); мощностью, рассеиваемой резистором,  $P$  (Вт); максимальной удельной мощностью рассеяния резистивной пленки  $P_o$  (Вт/см<sup>2</sup>).

*Конструкции подгоняемых резисторов.* Применяют плавную и ступенчатую подгонку сопротивлений резисторов. Плавная подгонка обеспечивает точность до сотых долей процента, ступенчатая – единицы процентов.

Плавную подгонку сопротивления, тонкопленочных резисторов осуществляют, изменяя удельное поверхностное сопротивление (при термическом, химическом или механическом воздействиях за счет упорядочения структуры или окисления пленки) или форму резистивной пленки (механическим или термическим удалением части резистивного материала). Подгонку ведут в сторону увеличения сопротивления (рис. 4.11, а, б).

Ступенчатая подгонка сопротивления осуществляется удалением металлических перемычек в подгоночных секциях. В конструкциях (рис. 4.11, а, б) сопротивлению основного резистора добавляют сопротивление секций с постоянным (рис. 4.11, б) или переменным (рис. 4.11, а) шагом.

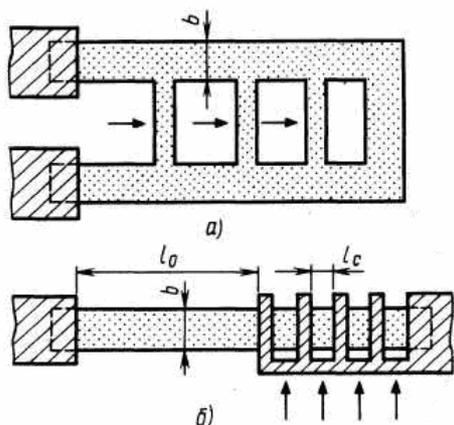


Рис. 4.11. Конструкции пленочных резисторов со ступенчатой подгонкой сопротивления: путем добавления секций перерезанием перемычек (а, б)

### 4.3.2. Выбор технологии и материалов

Параметры тонкопленочных резисторов в первую очередь определяются свойствами применяемых для их изготовления материалов. Подобные материалы должны обеспечивать: достаточно высокое удельное сопротивление формируемых на их основе резистивных пленок; высокую стабильность сопротивления тонкопленочных резисторов во времени и в широком интервале температур; высокую антикоррозионную стойкость напыленных пленок в условиях повышенной влажности; высокую адгезию резистивных пленок к подложке или к ранее напыленным пленкам; такой же ТКЛР пленок, как и ТКЛР материала подложки; стабильные свойства при напылении на них пленок из других материалов.

В качестве резистивных материалов тонкопленочных резисторов используют чистые металлы и сплавы с высоким электрическим сопротивлением, а также специальные резистивные материалы – керметы, которые состоят из частиц металла и диэлектрика (например, Cr и SiO). Широко распространены пленки хрома и тантала. Сплавы имеют большее значение  $\rho_s$  по сравнению с пленками чистых металлов. На основе керметов получают высокоомные резисторы. Наиболее распространен кермет, в состав которого входят хром и моноокись кремния (50...90 % Cr, 50... 10 % SiO). В зависимости от содержания хрома можно получить резистивные пленки с  $\rho_s = 100 \dots 10000 \text{ Ом}/\square$ , обладающие высокой стабильностью. Однако в связи с тем, что свойства керметных пленок в сильной степени зависят от технологических факторов, резисторы имеют худшую воспроизводимость номиналов и больший ТКР (температурный коэффициент сопротивления) по сравнению с металлическими. В настоящее время промышленностью освоена большая группа металлосилицидных сплавов системы Cr-Si, легированных небольшими добавками железа, никеля, кобальта, вольфрама (PC-3001, PC-3710, PC-5604K, МЛТ-3М, PC-5406H). При сравнительно малом ТКР и высокой стабильности воспроизводимости удельных поверхностных сопротивлений диапазон номиналов сплавов PC достаточно широк: 0,05...50 кОм/ $\square$ . Наиболее часто используют сплавы PC-3001, PC-3710 (37,9 % Cr, 9,4 % Ni, 52,7 % Si), МЛТ-3М (43,6 % Si, 17,6 % Cr, 14,1% Fe, 24,7 % W).

Для изготовления толстопленочных резисторов применяют пасты, состоящие из основного функционального материала (наполнителя), порошка стекла (фритта) и органической связки. В качестве наполнителя резистивных паст применяют серебро, палладий и их сплавы, окислы таллия и рутения. Для получения фритты наиболее широко используются свинцовые и цинковые боросиликатные стекла. После термообработки пасты, нанесенной на подложку через маску, образуется резистивная стеклоэмаль. Удельное поверхностное сопротивление  $\rho_s$  и температурный коэффициент стеклоэмали  $\alpha_{\rho_s}$  зависят от процентного содержания наполнителя и стекла в исходной пасте. Повышенными температурной и временной стабильностью характеризуются стеклоэмали, в состав которых входит сплав палладий – серебро. Промышленностью выпускаются десять типов резистивных паст с удельным поверхностным сопротивлением получаемых из них толстых стеклоэмалевых пленок от 5 Ом/ $\square$  до 100 кОм/ $\square$ .

В толстопленочных микросхемах используют главным образом прямоугольные полосковые резисторы. Резисторы сложной формы использу-

ют в тонкопленочных гибридных микросхемах для формирования сопротивлений больших номиналов. Применение таких конструкций позволяет несколько сэкономить площадь, отводимую под резистор, и оптимально скомпоновать топологию для размещения других элементов и компонентов микросхемы.

### 4.3.3. Расчет основных геометрических размеров резистора

Пленочный резистор располагают на поверхности диэлектрической подложки. Конструктивно он состоит из резистивной пленки, имеющей определенную конфигурацию, и контактных площадок. С учетом требований автоматизации проектирования во всех этих конфигурациях отсутствуют пересечения не под прямым углом и криволинейные контуры. Пленочные резисторы должны обладать высокой стабильностью сопротивления во времени и в интервале температур, низким уровнем шумов, малыми значениями паразитных параметров, требуемой мощностью рассеяния и минимальной занимаемой площадью.

Значение сопротивления пленочного полоскового резистора определяется по формуле

$$R = \rho_v \left( \frac{l}{b\delta} \right) + 2R_k, \quad (4.1)$$

где  $\rho_v$  – удельное объемное сопротивление;

$R_k$  – переходное сопротивление областей контактов резистивной и проводящей пленок;

$b$  - толщина резистивной пленки.

У высокоомных резисторов сопротивление областей контактов обычно значительно меньше сопротивления резистивной пленки, поэтому

$$R = (\rho / \delta)(l/b) = \rho_s K_\phi, \quad (4.2)$$

где  $\rho_s$  - удельное поверхностное сопротивление (сопротивление квадрата пленки толщиной  $\delta$ );

$K_\phi = l/b$  – коэффициент формы резистора.

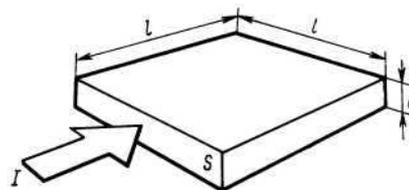
$$\rho_s = \rho / \delta, \quad (4.3)$$

$$K_\phi = l/b. \quad (4.4)$$

Удельное поверхностное сопротивление пленки или любого другого тонкого слоя (например, диффузионного, ограниченного  $p$ - $n$  переходом)

играет важную роль в расчетах, связанных с сопротивлением элементов различных конфигураций, формируемых из тонких слоев резистивного материала. На рис. 4.12 показан квадрат резистивной пленки толщиной  $\delta$  со стороной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$ . Через его боковые грани протекает электрический ток  $I$ .

Рис. 4.12. Схематическое изображение прохождения электрического тока через квадратный участок резистивной пленки, поясняющее смысл удельного поверхностного сопротивления



Из известного выражения  $R = \rho_v l/S$  можно получить выражение для удельного поверхностного сопротивления однородного слоя резистивного материала с равномерной толщиной  $l$

$$\rho_s = \frac{\rho \cdot l^2}{S} = \frac{\rho_x l}{l\delta} = \frac{\rho_v}{\delta}. \quad (4.5)$$

Удельное поверхностное сопротивление тонких пленок для наиболее широко применяемых материалов лежит в пределах от 100 до 10000 Ом/□, толстых пленок в пределах 10 Ом...1 МОм/□.

Коэффициент формы прямоугольных резисторов  $K_\phi = 0,1... 100$ . Для высокоомных резисторов необходимы большие значения  $K_\phi$ . Повышение  $K_\phi$  возможно уменьшением  $b$  и увеличением  $l$ . Значения  $b$  ограничены по минимуму возможностями технологии, требованиями к точности сопротивления и рассеиваемой мощностью, а значения  $l$  ограничены по максимуму как возможностями технологии, так и приемлемыми габаритными размерами резисторов. Например, при формировании тонкопленочных резисторов с помощью масок  $K_\phi \leq 10$ , т.к. длинные щели в маске снижают жесткость ее конструкции. Низкие значения  $K_\phi$  в основном ограничиваются приемлемыми габаритными размерами низкоомных резисторов при технологических ограничениях на минимальные расстояния между контактными площадками  $l$ .

Для определения геометрических размеров резисторов необходимо располагать следующими исходными данными: номинальным значением сопротивления  $R$  (Ом); сопротивлением квадрата резистивной пленки  $\rho_{кв}$  (Ом/□); относительной погрешностью сопротивления резистора  $\gamma_R$  (%); мощностью, рассеиваемой резистором,  $P$  (Вт); максимальной удельной мощностью рассеяния резистивной пленки  $P_o$  (Вт/см<sup>2</sup>).

#### 4.3.4. Определение паразитных параметров

Температурный коэффициент сопротивления (ТКР) пленочного резистора определяется в основном нестабильностью удельного поверхностного сопротивления, отношение же  $l/b=K_\phi$  с изменением температуры меняется практически очень мало в силу того, что резистивный слой жестко сцеплен с подложкой, имеющей малый температурный коэффициент линейного расширения (обычно меньше  $10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ).

Таким образом, ТКР пленочного резистора  $\alpha_R \approx \alpha_{ps}$ , где  $\alpha_{ps}$  – температурный коэффициент удельного поверхностного сопротивления, зависящий от состава материала и толщины пленки, а также условий ее формирования. Относительное изменение сопротивления пленочного резистора при изменении его температуры на  $\Delta T$  составляет:

$$(\Delta R/R)_m = \alpha_{ps} \Delta T = \alpha_{ps} (T - T_n), \quad (4.6)$$

где  $T_n$  – нормальная температура ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Коэффициент старения пленочного резистора ( $K_{cmR}$ ) определяет временную нестабильность сопротивления. Он тоже практически равен коэффициенту старения удельного поверхностного сопротивления  $K_{cm\rho_s}$ :

$$K_{cmR} = (\Delta R/R)_{cm} / \Delta t \approx K_{cm\rho_s}, \quad (4.7)$$

где  $\Delta t$  – промежуток времени, в течение которого поверхностное сопротивление изменилось на величину  $\Delta \rho_s$ . Удельное сопротивление изменяется в процессе эксплуатации и хранения микросхемы вследствие постепенного изменения структуры пленки и ее окисления. С увеличением нагрузки (мощности рассеяния) и повышением рабочей температуры интенсивность старения материала возрастает. За время  $t$  эксплуатации или хранения относительное изменение сопротивления составит:

$$(\Delta R/R)_{cm} \approx K_{cm\rho_s} t. \quad (4.8)$$

Нагрузочная способность пленочных резисторов определяется удельной мощностью рассеяния  $P_0$ .

Для уменьшения размеров резистора желательно выбирать резистивный материал с большей удельной рассеиваемой мощностью  $P_0$ . Значение удельной мощности ограничивается максимальной рабочей температурой резистивной пленки  $T_{Rmax}$ . Для тонкопленочных резисторов  $P_0 = 10 - 30 \text{ мВт/мм}^2$ , для толстопленочных  $P_0 = 40 \dots 80 \text{ мВт/мм}^2$ .

Паразитные индуктивность  $L_R$  и емкость  $C_R$  определяют *частотные свойства* пленочных резисторов. Индуктивность (мкГн) пленочного резистора прямоугольной формы

$$L_R = 2 \cdot 10^{-3} l [\ln(2l/b) + 0,255b/l + 0,5], \quad (4.9)$$

где  $l, b$  – размеры резистора, см.

Влияние индуктивного сопротивления резистора ( $\omega L_R$ ) на полное проявляется в низкоомных резисторах на достаточно высоких частотах при  $(\omega L_R)^2 \geq 0,1 R^2$ , т.е. при  $\omega L_R/R \geq 0,3$ .

$$|Z_R| = \left[ R^2 + (\omega L_R)^2 \right]^{0,5}. \quad (4.10)$$

Паразитная емкость пленочного резистора в основном определяется емкостями резистивного слоя и контактных площадок. Наибольшее их влияние на полное сопротивление проявляется в высокоомных резисторах.

Приведенные выше параметры пленочных резисторов определяются свойствами применяемых резистивных материалов, толщиной резистивной пленки и условиями ее формирования. Для создания гибридных микросхем необходимы резистивные пленки с удельным поверхностным сопротивлением  $\rho_s$  от 10 до 10000 Ом/□. Чем меньше толщина пленок, тем выше  $\rho_s$ , но одновременно повышается ТКР, а также ухудшается временная и температурная стабильность пленок.

## Тема 4.4

### ПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

#### 4.4.1. Конденсаторы. Выбор технологии и материалов

Наряду с резисторами пленочные конденсаторы относятся к числу наиболее распространенных элементов гибридных микросхем. По конструкции пленочные конденсаторы чаще всего представляют собой трехслойную структуру металл-диэлектрик-металл и состоят из нижней и верхней обкладок, разделенных слоем диэлектрического материала (рис. 4.13).

К конструкции конденсаторов предъявляется ряд конструктивно-технологических требований: минимальные габаритные размеры; воспроизводимость характеристик в процессе производства; совместимость технологии их изготовления с процессами производства других элементов гибридной интегральной микросхемы.

Конструкция, изображенная на рис. 4.13, *a*, характерна для конденсаторов с повышенной емкостью (сотни – тысячи пикофарад). Ее особенностью является то, что контур верхней обкладки полностью вписывается в контур нижней обкладки. Эта конструкция имеет следующие положительные качества: неточность совмещения контуров обкладок не сказывается на величине емкости; контур диэлектрика заходит за пределы обеих обкладок. В этом случае гарантируется надежная изоляция обкладок по периферии конденсатора при предельном их несовмещении.

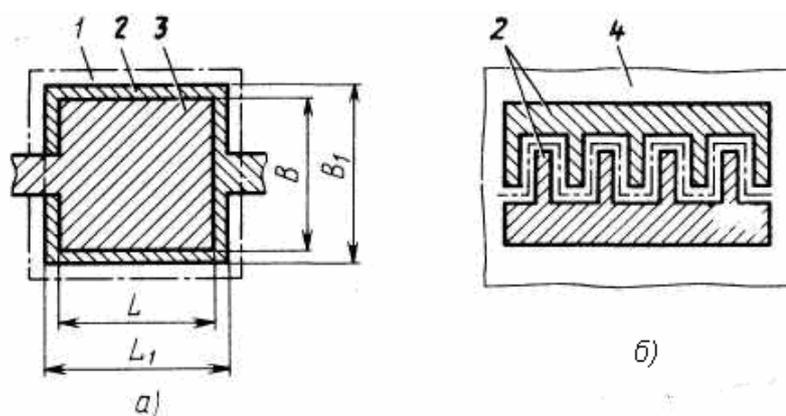


Рис. 4.13. Разновидности конструкций тонкопленочных конденсаторов: *a* - с активной площадью перекрытия обкладок  $S = 5 \text{ мм}^2$ , *б* - гребенчатая, 1 – диэлектрик, 2 - нижняя обкладка, 3 - верхняя обкладка, 4 – подложка, 5 - компенсатор

Пленочный конденсатор с большой емкостью может иметь сложную конфигурацию, отличную от прямоугольной, причем линии периметра обкладок обязательно пересекаются под прямым углом. При разработке топологии микросхемы конструктор может полностью использовать свободные участки площади подложки.

Конструкция пленочного конденсатора, изображенная на рис. 4.13, *б*, характерна для конденсаторов с небольшой емкостью (десятки пикофарад), когда для получения необходимой емкости достаточна площадь взаимного перекрытия двух коммутационных проводников, разделенных пленкой диэлектрика. Емкость рассматриваемого конденсатора нечувствительна к смещению обкладок из-за неточности совмещения.

Конструкции подгоняемых конденсаторов. Иногда возникает необходимость конструирования пленочных конденсаторов с повышенной точностью воспроизведения емкости, превосходящей технологические возможности способа их изготовления, или конденсаторы, емкость которых может изменяться в определенных пределах. В этом случае в конструкции пленочного конденсатора приходится предусматривать кроме основной

секции с неизменяемой емкостью участок, емкость которого можно каким-либо способом изменять. Подгонка может осуществляться как в сторону уменьшения (отрезанием секций, рис. 4.14, а), так и в сторону увеличения (подключением секций рис. 4.14, б) емкости.

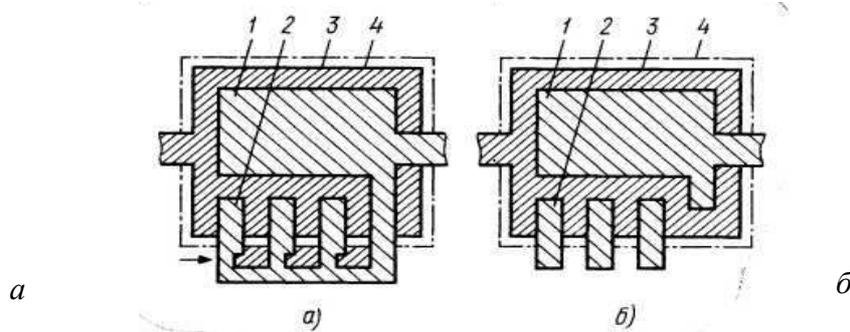


Рис. 4.14. Конструкции подгоняемых пленочных конденсаторов: 1 - верхняя обкладка, 2 - подгоночные секции, 3 - нижняя обкладка, 4 - диэлектрик

Материал диэлектрика конденсатора в значительной степени определяет его характеристики. К диэлектрику конденсаторов предъявляются следующие требования: высокая диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$ , малый температурный коэффициент диэлектрической проницаемости  $\alpha_{\epsilon_r}$ , высокая электрическая прочность, низкие диэлектрические потери, высокое сопротивление изоляции, хорошая адгезия, совместимость с технологическими процессами изготовления других элементов микросхемы.

Диэлектрические пленки *тонкопленочных конденсаторов* формируются обычно напылением в вакууме, химическим осаждением из газовой фазы или окислением. Характерной особенностью напыленных и осажденных пленок является зернистая структура. Пленки, полученные окислением, имеют поры. В результате миграции атомов металлов обкладок в пространстве между зернами или в порах диэлектрика возможно существенное снижение сопротивления изоляции и напряжения пробоя диэлектрических пленок, а также локальные короткие замыкания обкладок как в процессе производства, так и в процессе эксплуатации микросхем. Чтобы уменьшить количество дефектов в диэлектрике, совершенствуют технологию их нанесения, разрабатывают новые материалы, применяют многослойный диэлектрик.

В качестве диэлектрика конденсаторов применяют моноокись кремния  $\text{SiO}_2$ , моноокись германия  $\text{GeO}_2$ , халькогенидное стекло ХГ-44, окислы алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , тантала  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , титана  $\text{TiO}_2$ , окислы редкоземельных ме-

таллов. Высокие удельные емкости позволяют получить титанаты бария и кальция.

Особенно перспективны диэлектрические пленки из сложных по составу стекол.

Так, стеклообразные пленки, содержащие  $I_2O_3$ ,  $B_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ , имеют высокие технологические качества и значения  $\epsilon_r$  при комнатной температуре и  $f = 1$  кГц, равные 11...12,  $\text{tg } \delta = 0,0025...0,0035$ ,  $E_{np} = (2,5...3,5) \cdot 10^6$  В/см, ТКС =  $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , удельную емкость  $100000$  пФ/см<sup>2</sup>, а пленки состава  $BaO$ ,  $Ta_2O_5 \cdot Vi_2O_3 \cdot I_2O_3 \cdot GeO_2$  имеют  $\epsilon_r = 40...50$ ,  $\text{tg } \delta = 0,005...0,008$ ,  $E_{np} = (2...3) \cdot 10^6$  В/см, ТКС  $\approx (0,5...0,8) \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  и удельную емкость  $100...200$  тысяч пФ/см<sup>2</sup> при толщинах  $0,2...0,4$  мкм.

Для толстопленочных конденсаторов используют пасты, содержащие в качестве наполнителей титанат бария или двуокись титана, которые имеют высокую диэлектрическую проницаемость. Титанат бария позволяет получить удельную емкость  $\epsilon_0 \approx 8000$  пФ/см<sup>2</sup> при толщине пленки около  $25$  мкм. Конденсаторы на основе титаната бария характеризуются большими диэлектрическими потерями на высоких частотах, потому применяются в качестве блокировочных и разделительных. Пленки с наполнителем из двуокиси титана обеспечивают  $\epsilon_0 \approx 1000$  пФ/см<sup>2</sup> и малые потери на частотах вплоть до  $500$  МГц. Стеклоэмали без наполнителей имеют малую диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon_r \approx 10$ ) и используются в качестве изоляционных материалов в местах пересечения проводников.

Стеклоэмалевые пленки имеют монокристаллическую структуру, поэтому конденсаторы с таким диэлектриком характеризуются повышенной надежностью. Отсутствие микроотверстий в диэлектрической пленке обеспечивается с помощью двухслойной печати. При этом один слой заполняет пустоты в другом слое.

Материал обкладок конденсатора должен удовлетворять следующим требованиям: иметь низкое электрическое сопротивление (особенно для высокочастотных конденсаторов); обладать низкой миграционной подвижностью атомов; иметь ТКЛР, равный ТКЛР подложки и диэлектрического слоя; иметь хорошую адгезию как к подложке, так и к ранее напыленным пленкам; обладать высокой антикоррозионной стойкостью в условиях агрессивной среды. Для устранения теплового разрушения диэлектрика в процессе нанесения верхней обкладки необходимо применять материал с низкой температурой испарения. Нижняя обкладка конденсатора должна иметь мелкокристаллическую структуру. Не допускается образование кристаллов, выступы которых снижают толщину и соответственно электрическую прочность диэлектрика.

Большинству требований, предъявляемых к материалам обкладок, удовлетворяет алюминий. Атомы и мельчайшие частицы алюминия, попавшие в межзеренные области диэлектрика, интенсивно окисляются, что способствует устранению проводящих цепочечных структур между обкладками. Кроме того, участки алюминиевых обкладок в области коротких замыканий самоизолируются от короткозамыкающих мостиков вследствие термического испарения алюминия при протекании тока короткого замыкания.

Для изготовления обкладок тонкопленочных конденсаторов чаще всего применяются следующие материалы: алюминий А99, тантал ТВЧ, титан ВТ1-0.

Обкладки толстопленочных конденсаторов изготавливаются из паст с высоким (более 70 %) содержанием таких металлов, как палладий, золото, сплавов палладий - золото и др. Проводники, содержащие золото, имеют  $\rho_s \approx 0,005 \text{ Ом/}\square$ .

#### 4.4.2. Выбор типа конструкции.

##### Расчет основных размеров элементов конденсаторов

**Расчет основных размеров элементов конденсаторов.** В высокочастотных конструкциях применяют гребенчатые конденсаторы (рис. 4.13, б). Роль обкладок выполняют пленочные проводники в форме гребенки. Здесь используется составной диэлектрик подложка – воздух или подложка – диэлектрическое покрытие.

Емкость пленочного конденсатора, пФ, рассчитывается по известной формуле

$$C = 0,0885 \varepsilon_r S / d = C_0 S, \quad (4.10)$$

где  $S$  – площадь взаимного перекрытия обкладок, см<sup>2</sup>;  
 $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  
 $d$  – толщина диэлектрика, см;  
 $C_0$  – удельная емкость, пФ/см<sup>2</sup>,

$$C_0 = 0,0885 \varepsilon_r / d. \quad (4.11)$$

Минимальное значение  $d$  ограничено требованием сплошности пленки, рабочим напряжением, требуемой точностью емкости, качеством пленки и связанным с ней выходом годных, эксплуатационной надежностью конденсатора; максимальное значение  $d$  ограничено механической прочностью сцепления пленки с подложкой. С ростом толщины уровень механических напряжений, обусловленный разностью ТКЛР пленки и подложки, увеличивается.

Емкость гребенчатого конденсатора определяется погонной емкостью между соседними элементами и средней длиной диэлектрического канала между элементами гребешков.

При активной площади пленочного конденсатора менее  $5 \text{ мм}^2$  начинает сказываться краевой эффект, причем тем сильнее, чем меньше площадь. Если расчетная площадь конденсатора менее  $5 \text{ мм}^2$ , его можно выполнять в виде двух последовательно соединенных конденсаторов. При малых емкостях (единицы или доли пикофарад), когда расчетная площадь пленочного МДМ-конденсатора слишком мала и технология не позволяет его выполнить в виде трехслойной пленочной структуры, можно формировать конденсатор в виде двух параллельных проводящих полосок.

При малых размерах площади верхней обкладки конденсатора (менее  $5 \text{ мм}^2$ ) для устранения погрешности емкости, вызванной смещением вывода верхней обкладки при совмещении топологии верхней и нижней обкладок, с противоположной стороны вывода делают компенсатор

Потери в обкладках зависят от расположения выводов нижней и верхней обкладок по отношению друг к другу. При высоких частотах предпочитают вариант конструкции с двусторонним расположением выводов, так как на частотах выше 10 МГц емкость конденсатора с ростом частоты падает медленнее при двустороннем расположении выводов.

#### 4.4.3. Оценка паразитных параметров конденсаторов

*Температурный коэффициент емкости* (ТКС,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) пленочных конденсаторов практически полностью определяется температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости диэлектрика, которая для большинства используемых в качестве диэлектрика конденсатора материалов колеблется в пределах от  $-60 \cdot 10^{-6}$  до  $+500 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

*Коэффициент старения*, определяющий в основном изменение емкости конденсатора вследствие изменений свойств пленочного диэлектрика с течением времени, для используемых материалов обычно равен  $(1...5) \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ .

*Рабочее напряжение* пленочного конденсатора  $U_{\text{раб}}$  обеспечивается подбором материала диэлектрической пленки с необходимым значением электрической прочности (пробивной напряженности электрического поля)  $E_{\text{пр}}$  и необходимой толщиной пленки  $d$ .

Толщина диэлектрика, выбираемая из условия обеспечения заданного рабочего напряжения, определяется формулой

$$d = K_3 \frac{U_{раб}}{E_{np}}, \quad (4.12)$$

где  $K_3$  – коэффициент запаса, необходимый для обеспечения надежностных характеристик и равный 3...10. Последнее значение относится к конденсаторам повышенной надежности. Для большинства используемых диэлектрических материалов  $E_{np} = (1...9) \cdot 10^6$  В/см.

*Добротность* пленочного конденсатора  $Q$  существенно зависит от его конструкции и используемых материалов

$$Q = (\operatorname{tg}\delta_{\partial} + \operatorname{tg}\delta_{o.в.})^{-1}. \quad (4.13)$$

где  $\operatorname{tg}\delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь в диэлектрике. Для большинства используемых материалов диэлектриков  $\operatorname{tg}\delta_{\partial} = 10^{-2}...10^{-3}$  на частоте 1 МГц;

$\operatorname{tg}\delta_{\partial} = C(r_0 + r_e)$  - тангенс угла потерь в обкладках и выводах.

Сопротивление обкладок  $r_0$  зависит от конструкции конденсатора, проводимости материалов обкладок и их геометрических размеров, картины распределения линий тока в обкладках. Для конденсатора с двусторонним расположением выводов

$$r_0 \approx (r_{o.н} + r_{o.в.})/3, \quad (4.14)$$

где  $r_{o.н}$  и  $r_{o.в.}$  – сопротивления нижней и верхней обкладок соответственно.

*Добротность* пленочных конденсаторов лежит в интервале значений 10...100.

## Раздел 5

### ЗАЩИТА ОТ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

#### Тема 5.1

### ЗАЩИТА ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

#### 5.1.1 Анализ механических сил, действующих на РЭС

В процессе эксплуатации конструкции РЭА могут подвергаться воздействию целого ряда механических факторов: вибраций, ударов, линейных нагрузок, акустических шумов, комплексных воздействий. При этом, как показывает опыт эксплуатации, наибольшее разрушающее влияние на конструкцию оказывает различного рода вибрация.

*Вибрацией* называется знакопеременное воздействие механической силы, характеризуемое амплитудой (ускорением), частотой и фазой. Различают гармонические (узкополосные) и широкополосные вибрации.

*Удары* характеризуются кратковременным (мгновенным) воздействием механической силы на аппарат и отличаются длительностью и амплитудой.

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

Вибрации и удары характеризуются направленностью приложения механической силы.

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

*Акустический шум* – это распространяющиеся в газах, жидкостях и в материале конструкции упругие волны. Они имеют в большинстве случаев пространственный характер и также характеризуются интенсивностью и частотой. Акустические шумы возникают при работе мощных двигателей (особенно реактивных), а также из-за возникающих аэродинамических эффектов при движении самолетов или ракет в достаточно плотных слоях атмосферы.

*Комплексные воздействия* – это комбинация из первых четырех выше-названных. Например, может быть одновременное воздействие на изделие вибраций и ударов, вибраций и линейных нагрузок и т. д. Подобные воздействия наиболее часто встречаются в реальных условиях эксплуатации.

Частотный диапазон вибраций, воздействующих на изделия РЭУ, может быть в пределах 0 – 7000 Гц, амплитуда вибраций может достигать 40 мм, ускорение – до 20  $g$  (при ударах, толчках и взрывах снарядов – до 200  $g$ ), замедления – до 4  $g$ . Величина акустического шума на частоте 30 кГц может превышать пороговый уровень на 740 – 160 дБ.

### **5.1.2. Реакция РЭС и их элементов на механические воздействия**

При воздействии на РЭУ вибраций, ударов, линейных нагрузок и акустических шумов возможно возникновение нарушений ее функционирования, которые можно разделить на восстанавливаемые и невосстанавливаемые.

*Восстанавливаемые* отказы функционирования РЭУ, к которым относят искажение или появление в полезном сигнале большого уровня шумов и паразитную модуляцию полезного сигнала, возникают из-за тензорезистивных эффектов, пьезоэлектрических и электромагнитных явлений в элементах, обладающих способностью к проявлению подобных эффектов при знакопеременных деформационных нагрузках.

К таким элементам относят тонкопленочные резисторы на подложках микросхем, сегнетокерамические конденсаторы, полупроводниковые приборы и даже обычные проводники, колеблющиеся в магнитных полях.

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

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

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

При больших уровнях вибрационной нагрузки возможно разрушение конструктивного элемента после некоторого количества циклов изменения нагрузки, обусловленной вибрацией.

Кроме механической ветви реакции элементов РЭУ на механические воздействия существует и электрическая ветвь, обусловленная механическими процессами – деформацией и механическими напряжениями. Эта ветвь реакции определяет устойчивость РЭУ к механическим воздействиям. Под *устойчивостью* понимают нормальное функционирование РЭУ при механических воздействиях. Если РЭУ не обладает достаточной устойчивостью, то в ее выходном сигнале могут появиться составляющие, не предусмотренные функциональным назначением. Возможно появление шумового напряжения достаточно высокого уровня. Наиболее типичными причинами нарушения устойчивости работы РЭУ при механических воздействиях являются следующие: изменение значения переходного сопротивления в контактных группах разъемов, реле, герконов и т.д.; изменение параметров пассивных элементов (тонкопленочных резисторов, катушек индуктивности, некоторых типов конденсаторов); изменение параметров активных элементов; появление шумовых напряжений в проводниках, колеблющихся в магнитных полях; появление шумовых напряжений в кабелях за счет возникающих электрических зарядов на деформируемых при механических воздействиях высококачественных диэлектриках.

### **5.1.3. Способы виброзащиты конструкций РЭС**

Известно несколько способов защиты аппаратуры от вибраций. К ним относятся: изменение соотношения между собственными частотами конструкций и частотами возмущающей силы; экранирование упругих волн источника; уравнивание возмущающих нагрузок механизмов; изоляция вибраций и применение динамических гасителей.

Применение того или иного способа уменьшения вибраций зависит от конкретных условий эксплуатации изделия РЭУ. Сущность первого способа защиты от вибраций заключается в изменении частоты возмущающей силы, если это возможно, либо в изменении резонансной частоты конструкции относительно основной и кратных частот источника упругих колебаний. Изменение резонансной частоты конструкции можно осуществить изменением жесткости. В связи с тем, что спектр возбуждения обычно состоит из многих гармонических составляющих, резонансную частоту конструкции необходимо разместить между основными частотными составляющими источника возмущений.

Для осуществления *экранирования* упругих волн между источником вибраций и конструкцией устанавливаются экраны из материалов, отли-

чающихся от материалов конструкции. Например, если упругие волны распространяются в эластичных средах (резина, поролон, полиуретан и др.), в качестве экрана можно использовать металлические прокладки, колпаки, цилиндры, решетки, которые приклеиваются к эластичной среде. Если колебания распространяются в металле, то экранами могут быть эластичные материалы, воздушные зазоры и щели.

Эффективность экранирования упругих волн зависит от соотношения размеров экрана и длины распространяющихся волн. Опытным путем установлено, что экранирование упругих волн начинается тогда, когда «глубина» экрана (размер, характеризующий погружение экрана в среду, в котором распространяются упругие волны) больше или равна  $0,3 \lambda$ .

Способ *уравновешивания* возмущающих нагрузок заключается в выполнении таких конструкций, у которых центр масс лежит на оси вращения (условие равенства нулю главного вектора сил инерции), а ось вращения совпадает с главной осью инерции (условие равенства нулю главного момента сил инерции). Уравновешивание возмущающих нагрузок обычно достигается добавлением противовесов или снятием излишнего материала.

Способ *изоляции* вибрации заключается в том, что между изолируемой конструкцией и основанием устанавливаются амортизаторы. Изоляция вибраций является наиболее универсальным и наиболее распространенным способом защиты конструкции РЭУ от вибраций и ударов.

Эффективным средством защиты конструкции РЭС от механических воздействий является *введение демпфирования*. В ряде случаев оно используется совместно с амортизацией. Наиболее перспективным и распространенным способом демпфирования конструкций РЭС является одно- или двусторонняя заливка или введение высокоэффективных *вибропоглощающих материалов* в структуру несущих оснований. Эти способы основаны на способности полимеров рассеивать большое количество энергии при растяжении, изгибе или сдвиге за счет упругих свойств. К недостаткам данных способов относятся: худшая ремонтпригодность при заливке, худший теплоотвод от залитых элементов, сильная зависимость демпфирующих свойств от температуры, возможность возникновения больших внутренних напряжений в компаунде при изменении температуры, изменение свойств полимеров при воздействии радиации. Использование вибропоглощающих материалов позволяет снизить коэффициент виброизоляции ячеек с 40 до 3 за счет приклейки ИС к рамке ячейки

При одном и том же эффекте демпфирования толщина внешней заливки должна быть в 5... 10 раз больше, чем при введении вибропоглощающих материалов в структуру несущей конструкции.

### 5.1.4. Оценка виброзащитенности радиоаппаратуры

Для защиты аппаратуры от механических воздействий используются различные амортизаторы, поглощающие энергию колебательной системы или энергию удара. Амортизаторами могут быть специальные устройства, упругие прокладки, композиционные материалы, вязкоупругие полимерные и армированные материалы.

В общем случае блок, закрепленный на амортизаторах, может иметь 6 степеней свободы и соответственно 6 резонансных частот (три за счет перемещения вдоль осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и три за счет вращения). При известных значениях  $\omega$  и  $\omega_0$ , пользуясь номограммой (рис. 5.1) для демпфированной амортизирующей системы, можно оценить степень эффективности амортизатора  $\eta$  (т.е. отношение амплитуд колебаний блока к амплитуде колебаний основания).

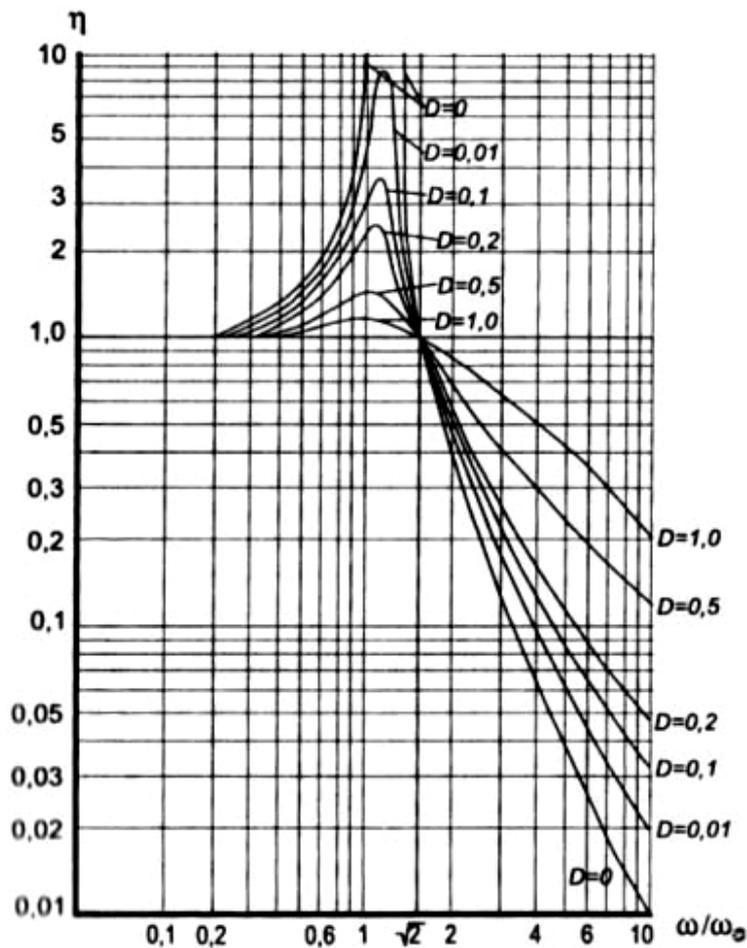


Рис. 5.1. Зависимость коэффициента виброизоляции амортизируемого прибора от соотношения  $\omega/\omega_0$  при различных значениях демпфирования

Коэффициент виброизоляции  $\eta$  прибора определяется отношением амплитуды колебаний прибора на амортизаторе к амплитуде вибросмещения основания, на котором установлен амортизатор.

Если амортизаторы нельзя установить симметрично центру тяжести (рис. 5.2), то их нагруженность вычисляется по следующим формулам:

- 1-й амортизатор

$$P_1^1 = \frac{P(l_1 - l_2)(b_1 - b_2)}{l_1 b_1}, \quad (5.1)$$

- 2-й амортизатор

$$P_2^1 = \frac{P l_2 (b_1 - b_2)}{l_1 b_1}, \quad (5.2)$$

- 3-й амортизатор

$$P_3^1 = \frac{P(l_1 - l_2)b_2}{l_1 b_1}, \quad (5.3)$$

- 4-й амортизатор

$$P_4^1 = \frac{P l_2 b_2}{l_1 b_1}, \quad (5.4)$$

где  $P_1^1, P_2^1, P_3^1, P_4^1$  – нагрузки на амортизаторы;

$P$  – вес блока;

$l_1, l_2, l_3, l_4$  – расстояние между амортизаторами блока и координаты его центра тяжести относительно амортизаторов.

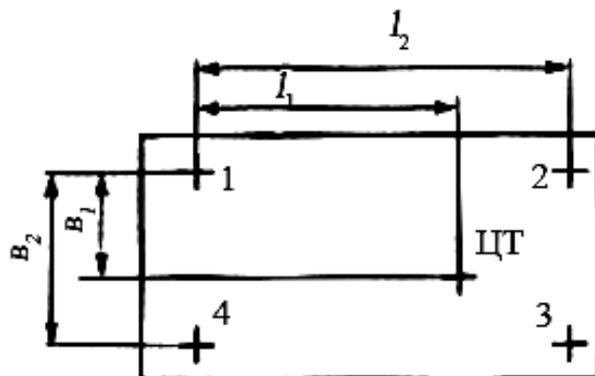


Рис. 5.2. К расчету нагруженности несимметрично расположенных относительно центра тяжести амортизаторов

Некоторые преимущества имеют разночастотные амортизаторы. Их основным элементом является конусная пружина, которая при перегрузке осаживается, часть витков выключается и жесткость возрастает. Таким способом можно автоматически поддерживать  $f_{рез}$  вдоль оси пружины примерно постоянной, поэтому их можно применять для блоков с несимметричным расположением центра тяжести. При этом значительно сокращается номенклатура амортизаторов. Например, от 0,25 до 16 кг достаточно только три их номера. Значение  $f_{рез}$  таких амортизаторов около 7 Гц.

К материалам для пружинных амортизаторов предъявляются весьма высокие требования. Они должны обладать устойчивыми упругими свойствами, достаточной прочностью, большим сопротивлением к ударным нагрузкам и большими пластическими деформациями. Для изготовления амортизаторов применяют специальные марки легированных сталей. На прочность и упругие свойства стали влияет ее химический состав. Содержание в стали углерода, легирующих примесей (например, марганца, кремния, хрома, никеля, ванадия и вольфрама в определенных количествах) повышает механические свойства стали, делает ее более упругой и прочной. Легирующие примеси повышают эффективность процессов термообработки. Ванадий и вольфрам добавляются в материал температуростойких амортизаторов.

Материал для пружинных амортизаторов выбирается с учетом условий эксплуатации, продолжительности и величины нагрузки, цикличности во времени, состояния окружающей среды, климатических факторов и т.д. На выбор марки стали влияют также технологические факторы, например, возможность термообработки и др.

Наибольшее распространение в пружинных амортизаторах получили марганцевые и кремнистые стали. Они относительно дешевые, не дефицитные и хорошо поддаются термообработке, что обеспечивает получение необходимых механических параметров.

Наилучшими по своим механическим свойствам являются кремнистые и вольфрамокремнистые стали с содержанием углерода 0,55 – 0,60 % и кремния 2 %.

Механические свойства амортизатора в сильной степени зависят от состояния поверхности материала. Поверхность должна быть гладкой, без закатов, раковин, штрихов и других дефектов, видимых глазом.

На усталостную прочность амортизатора и его сопротивление при ударной нагрузке отрицательно влияет обезуглероживание поверхностного слоя, получающегося при термической обработке.

Большие пределы усталости наблюдаются у образцов с полированной поверхностью, например, хромованадиевые стали.

## Тема 5.2 ЗАЩИТА РЭС ОТ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

### 5.2.1 Тепловой баланс и тепловой режим изделий

Проблема отвода тепла в РЭС является одной из важнейших проблем конструирования и разработки радиоэлектронных приборов. С появлением БИС с очень высокой плотностью размещения активных элементов на кристалле и с появлением плат, содержащих сотни ИС, вопросы обеспечения нормального теплового режима встали перед разработчиками электронной аппаратуры так остро, как никогда прежде. Дополнительные аспекты этой проблемы возникают при каждом новом скачке в области электрических характеристик приборов, например при повышении быстродействия логических ИС или при увеличении выходной мощности аналоговых схем.

Разработчика РЭА интересует не тепловой режим вообще, а **нормальный** (или заданный) тепловой режим. Тепловой режим **отдельного элемента** считается нормальным, если соблюдаются два условия:

1) температура элемента (или окружающей элемент среды) находится в пределах, определенных паспортом или техническими условиями на него, независимо от изменения окружающей аппаратуру среды;

2) температура элемента должна быть такова, чтобы обеспечивалась его работа с заданной надежностью. Первое условие является обязательным для каждого элемента. Второе — специально оговаривается в техническом задании (ТЗ) на аппаратуру.

Тепловой режим **всей аппаратуры** считается нормальным, если обеспечивается нормальный тепловой режим всех его элементов без исключения.

Электрорадиоэлементы и электрорадиоматериалы обладают ограниченной теплостойкостью, т. е. могут нормально работать лишь в заданном диапазоне температур. Причина этого в различных физических и химических процессах, которые при повышении (понижении) температуры либо развиваются лавинообразно, либо приводят к усиленному старению материалов.

Для понимания задачи защиты конструкций РЭУ от тепловых воздействий необходимо рассмотреть **баланс энергии**, подводимой и отводимой от изделия. Соотношение полезной и рассеиваемой в виде теплоты энергии определяется коэффициентом полезного действия  $\eta$ :

$$\eta = \frac{E_{пол}}{E_{сум}} = \frac{E_{пол}}{E_{пол} + E_{наг} + E_{рас}}, \quad (5.5)$$

где  $E_{пол}$  – полезная энергия;

$E_{сум}$  – подводимая к изделию энергия от источника питания;

$E_{наг}$  – энергия, затрачиваемая на нагрев элементов;

$E_{рас}$  – энергия, рассеиваемая в окружающем пространстве.

Элементы, выделяющие теплоту, называют **источниками**, поглощающие – **стоками**, а сам процесс – **теплообменом**. Конструкции изделий представляются в этом случае в виде системы тел с сосредоточенными многочисленными источниками и стоками теплоты. Поскольку выделение теплоты происходит в определенном объеме, то это теплорассеивающее пространство называют *нагретой зоной*. Реальная нагретая зона имеет весьма неравномерное расположение источников теплоты и ограничивается стенками корпуса (каркаса, кожуха). Таким образом, конструкцию РЭС при рассмотрении ее теплового режима можно представить как совокупность определенных нагретых зон различной иерархии, вложенных друг в друга.

Температурное состояние изделия, т.е. пространственно-временное изменение его температуры в зависимости от мощности источников и стоков энергии, от физических и геометрических параметров изделия и окружающей среды, называют **тепловым режимом изделия**.

Тепловой режим любого устройства можно охарактеризовать тепловой напряженностью, определяемой объемной или поверхностной плотностью теплового потока.

Объемная плотность теплового потока:

$$q_v = \frac{k \cdot P}{V}, \quad (5.6)$$

где  $k \cdot P = P_{рас}$  – мощность рассеивания в изделии, Вт;

$k$  – коэффициент потерь мощности ( $k = 0,8 \dots 0,9$ );

$P$  – потребляемая мощность, Вт;

$V$  – объем изделия (нагретой зоны),  $\text{дм}^3$ .

Поверхностная плотность теплового потока:

$$q_s = \frac{k \cdot P}{S}, \quad (5.7)$$

где  $S$  – площадь поверхности теплоотдачи,  $\text{м}^2$ .

В соответствии с плотностью теплового потока узлы и блоки РЭС подразделяют на теплонагруженные ( $q_s < 0,05 \text{ Вт/см}^2$ ) и теплонагруженные ( $q_s > 0,05 \text{ Вт/см}^2$ ). В теплонагруженных конструкциях их нагрев при естественном охлаждении относительно температуры окружающей среды не превышает 30 К. В теплонагруженных конструкциях требуется принудительное охлаждение.

### 5.2.2. Виды теплообмена в конструкциях

Отвод теплоты от элементов конструкции может происходить за счет конвекции, излучения и теплопроводности. В реальных конструкциях присутствует теплообмен всех трех видов, протекающий по своим вполне определенным законам.

*Конвекцией* называется процесс теплообмена, при котором перенос теплоты от одной нагретой точки к другой осуществляется макрочастицами газа или жидкости. Конвекция может быть естественной (в результате действия сил тяготения на газ или жидкость) или принудительной (вынужденной), когда перемещение газа или жидкости выполняется специальными устройствами.

Количество теплоты  $P_k$ , отдаваемое нагретым телом за счет конвекции, определяется по формуле

$$P_k = a_k \cdot S \cdot \Delta t, \quad (5.8)$$

где  $a_k$  – коэффициент теплообмена конвекцией;

$\Delta t$  – перепад температур между изотермическими поверхностями.

$S$  – площадь поверхности теплообмена,  $\text{м}^2$ .

Коэффициент теплообмена конвекцией зависит от физических свойств среды и материала конструкции, геометрических размеров тела. Установлено, что решающее влияние на процесс свободной конвекции имеют физические свойства среды и температурный напор, равный разности температур между телом и средой. Конфигурация тела имеет меньшее значение.

*Излучение* – перенос теплоты, основанный на способности физических тел излучать и поглощать тепловую энергию в виде электромагнитных волн. При попадании лучей на тело часть их отражается, а часть проникает внутрь тела. Глубина проникновения теплового излучения в диапазоне электромагнитных волн длиной 0,3...10,0 мкм и более незначительна. В проводниках все тепловое излучение обычно поглощается в поверхностном слое толщиной до 1 мкм, в непроводниках – порядка 1,3 мм.

Отношение отраженного излучения к падающему характеризуется *отражательной* способностью тела  $R$ , отношение поглощенного излучения к падающему – *поглощательной* способностью  $A$ . Наибольшей излучательной и наименьшей отражательной поверхностями обладают «абсолютно черные» поверхности ( $R = 0, A = 1$ ).

Отношение излучательной способности любого тела к излучательной способности «абсолютно черного» тела при определенной температуре называют *степенью черноты тела* и обозначают  $\varepsilon$ . Мощность теплового потока, отводимого от нагретого тела с помощью излучения, может быть приблизительно оценена по следующему выражению

$$P_{\text{л}} = a_{\text{л}} \cdot S \cdot \Delta t, \quad (5.9)$$

где  $a_{\text{л}}$  – коэффициент теплообмена излучением, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$S$  – площадь излучающей поверхности, м<sup>2</sup>;

$\Delta t$  – перегрев поверхности излучения относительно окружающей среды, К.

Коэффициент теплообмена излучением можно оценить по следующей приближенной формуле

$$a_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{нр}1,2} \cdot \Phi_{1,2} \cdot f(t_1, t_2), \quad (5.10)$$

где  $\varepsilon_{\text{нр}1,2}$  – приведенная степень черноты поверхности двух взаимодействующих тел;

$\Phi_{1,2}$  – коэффициент облученности;

$f(t_1, t_2)$  – функция, устанавливающая связь между температурами тел 1 и 2 при излучении.

Тепловое сопротивление при излучении определяется по выражению

$$R_{\text{тл}} = \frac{1}{(a_{\text{л}}/S)}. \quad (5.11)$$

*Теплопроводность* – это процесс теплообмена между находящимися в соприкосновении телами (или их частями), обусловленный взаимодействием молекул и атомов. Процесс передачи теплоты за счет теплопроводности (кондукции) возможен, если имеется градиент температуры в различных точках тела или в местах соприкосновения тел.

Тепловой поток через плоскую теплопроводящую стенку можно моделировать (рис. 5.3) процессом протекания электрического тока через резистор (метод электроанalogии).

Тепловой поток за счет теплопроводности  $P_T$  от более теплой области к более холодной описывается следующим выражением:

$$P_T = \frac{\lambda \cdot S \cdot (t_1 - t_2)}{d} = \frac{(t_1 - t_2)}{R}, \quad (5.12)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, характеризующий свойства материала стенки, Вт/(м · К);

$S$  – площадь распространения теплового потока по стенке, м<sup>2</sup>;

$t_1, t_2$  – температуры поверхностей стенки, К;

$d$  – толщина стенки, м.

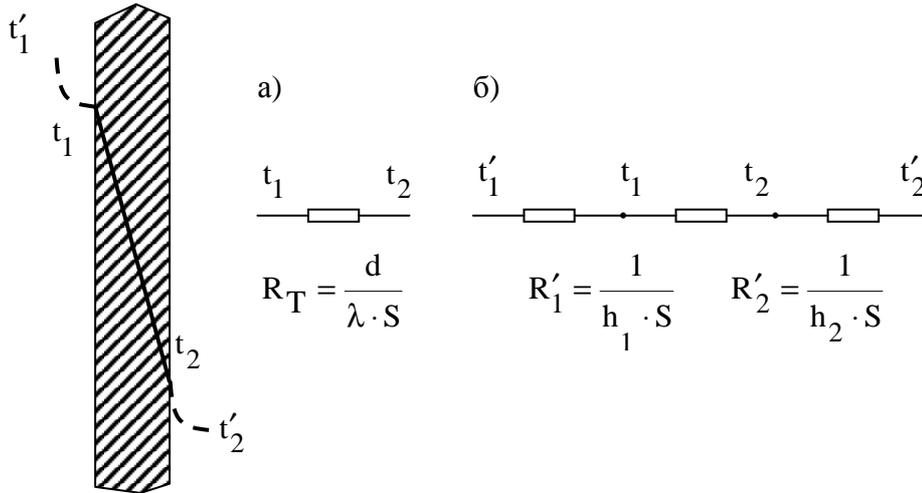


Рис. 5.3. Модель теплового потока через плоскую теплопроводящую стенку: а – модель при передаче теплоты кондукцией через плоскую стенку; б – эквивалентные схемы при передаче теплоты кондукцией через плоскую стенку

Отношение  $\frac{d}{\lambda \cdot S} = R_T$  называется кондуктивным тепловым сопротивлением, а обратная величина  $G_T = \frac{1}{R_T} = \frac{\lambda \cdot S}{d}$  – тепловой проводимостью.

Рассмотрим случай, когда тепловой поток проходит через границу раздела между двумя контактирующими (шероховатыми) поверхностями. При этом он распространяется двумя путями: один путь – через точки соприкосновения  $r$ , другой – через зазоры  $p$  (рис. 5.4).

Рассмотрим случай, когда тепловой поток проходит через границу раздела между двумя контактирующими (шероховатыми) поверхностями. При этом он распространяется двумя путями: один путь – через точки соприкосновения  $r$ , другой – через зазоры  $p$  (рис. 5.4).

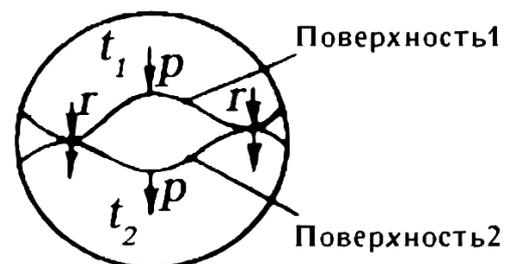


Рис. 5.4. Модель передачи теплоты между двумя шероховатыми контактирующими поверхностями

Общая теплопроводность представляет собой сумму

$$\lambda = \lambda \cdot r + \lambda \cdot p.$$

Мощность теплового потока, передаваемого через контактную площадь  $S_K$  определяется из выражения:

$$P = \lambda \cdot S_K \cdot (t_1 - t_2) = \frac{(t_1 - t_2)}{R_T}. \quad (5.13)$$

Если информации о поверхностях раздела недостаточно, то теплопроводность непосредственного контакта можно определить как:

$$\lambda = 2 \cdot a \cdot n \cdot \lambda_m + \frac{1,56 \cdot \lambda_m}{\gamma_1 + \gamma_2}, \quad (5.14)$$

где  $\gamma_1, \gamma_2$  – среднеквадратичные значения шероховатостей для поверхностей 1 и 2 соответственно;

$a$  – средний радиус точек контакта;

$n$  – число контактных точек на единицу площади;

$\lambda_m$  – теплопроводность контактирующих материалов:

$$\lambda_m = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}. \quad (5.15)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  – теплопроводности контактирующих поверхностей.

Для учета конвекционных потоков с двух сторон теплоотводящей стенки введем в эквивалентную схему для плоской стенки (рис. 5.4, б) два дополнительных резистора, моделирующих конвекционные потоки. Коэффициенты теплопередачи  $h_1$ , и  $h_2$  с обеих сторон стенки в общем случае различны и зависят от температуры охлаждающего потока и характера его протекания (ламинарный или турбулентный). Поэтому конвекционный перенос к стенке и от нее можно описать как

$$P = \frac{t_2' - t_1}{R_2'} = \frac{t_2 - t_1'}{R_1'}. \quad (5.16)$$

В этом случае отношение  $\frac{1}{h \cdot S}$  является конвективным тепловым сопротивлением.

Таким образом, для теплопроводящей стенки с учетом конвекции можно записать:

$$P = \frac{t_2' - t_1'}{R_1' + R_2' + R_T}. \quad (5.17)$$

В любом случае, когда идет речь о передаче теплоты между двумя точками, имеющими температуры  $t_1$  и  $t_2$ , тепловой поток, аналогично закону Ома, может быть задан уравнением

$$P = \frac{\Delta t}{R_{ТСУМ}}. \quad (5.18)$$

### 5.2.3. Классификация систем охлаждения

*Система охлаждения* – совокупность устройств и конструктивных элементов, используемых для уменьшения локальных и общих перегревов. Системы охлаждения обычно классифицируют по способу передачи теплоты, виду теплоносителя и источников теплоты.

Системы охлаждения, применяемые в РЭС, работают на разных принципах передачи тепла. Но наибольшее распространение получили системы передачи тепла конвекцией, т.е. системы газового (воздушного) и жидкостного охлаждения.

Системы газового и жидкостного охлаждения можно классифицировать по нескольким принципам:

1. по способу передачи теплоносителя – на системы естественного и принудительного охлаждения;
2. по способу воздействия на объекты охлаждения – системы прямого и косвенного охлаждения;
3. по количеству объектов охлаждения – системы общего и локального охлаждения;
4. по конструктивному исполнению – разомкнутые и замкнутые.

Одним из критериев эффективности средств рассеяния мощности является тепловое сопротивление

$$R_T = \Delta t / P, \text{ (К/Вт)},$$

где  $\Delta t$  – разность температур источника тепла и теплостока,  
 $P$  – мощность, рассеиваемая в аппаратуре.

На тепловое сопротивление влияют род охлаждающей жидкости и интенсивность ее движения. Значения удельных тепловых сопротивлений  $r_T$  (т.е. сопротивлений, отнесенных к единице теплоотдающей поверхности) для различных способов передачи тепла конвекцией приведены в табл. 5.1. Абсолютное большинство систем охлаждения, применяемых в РЭА, основаны на этих пяти способах теплоотдачи.

## Эффективность способов передачи тепла

Способ передачи тепла	$r_T \cdot 10^3, \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$
Естественная воздушная конвекция с излучением	500 – 60
Принудительная воздушная конвекция	100 – 10
Естественная конвекция в жидкости	5 – 2
Принудительная конвекция в жидкости	1 – 0,3
Кипение (испарение) жидкости	0,1 – 0,02

В конструкциях РЭС применяются естественное и принудительное воздушное охлаждение, жидкостные и испарительные системы охлаждения.

При естественном воздушном охлаждении теплота от элементов конструкции передается окружающей среде за счет естественной конвекции. Использование других систем охлаждения требует введения в конструкции РЭС различных устройств, содержащих теплоноситель и задающих режим его движения.

Выбор способа обеспечения нормального теплового режима и системы охлаждения РЭС производится на ранних стадиях разработки и основывается на определении плотности теплового потока  $q_s$  и допустимого перегрева конструкции  $\Delta t$  (рис. 5.5). Если точка попадает в заштрихованные области диаграммы, то способ охлаждения уточняется на более поздних этапах конструирования.

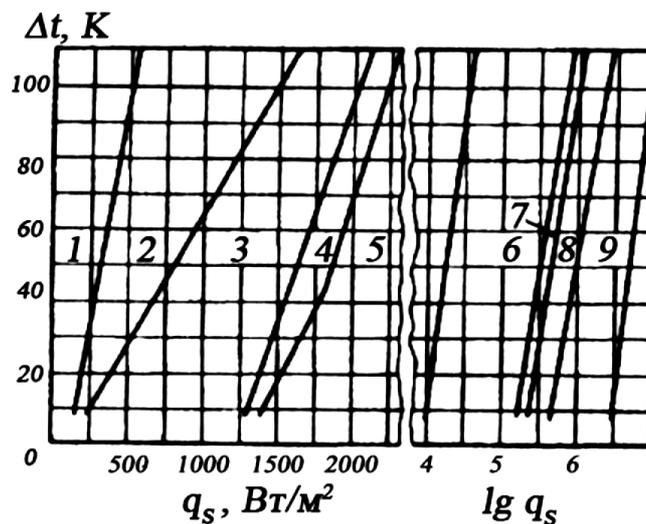


Рис. 5.5. График выбора способа охлаждения в конструкциях РЭС:

1 – естественное воздушное охлаждение, 2 – естественное или принудительное воздушное охлаждение, 3 – принудительное воздушное охлаждение, 4 – смешанное воздушно-жидкостное охлаждение, 5 – жидкостное охлаждение, 6 – жидкостно-испарительное охлаждение без прокачки, 7, 8 – жидкостно-испарительное охлаждение с интенсивной прокачкой, 9 – охлаждение испарением жидкости с прокачкой

### 5.2.3.1. Естественное воздушное охлаждение

В большинстве современных конструкций РЭС при нормальных климатических условиях обычно около 75 % теплоты отводится за счет естественной конвекции, 15 % – за счет теплопроводности и 10 % – за счет излучения.

Чтобы отвод теплоты от элементов конструкции, находящихся внутри изделия, был эффективным, должна быть обеспечена хорошая теплоотдача путем теплового контакта всех теплонагруженных элементов с корпусом изделия.

Эффективность охлаждения естественной конвекцией тем выше, чем больше поверхность корпуса охлаждаемого изделия (можно увеличить за счет использования ребер) и разность температур между корпусом и окружающей средой.

Для увеличения объема охлаждающего воздуха возможно выполнение в стенках корпуса перфорационных отверстий. Печатные платы с элементами желательно размещать вертикально, а не горизонтально, чтобы не было препятствий свободному току воздуха. Платы с недостаточно теплостойкими элементами желательно размещать внизу конструкции, т. е. в зоне с наименьшей температурой.

Охлаждение естественной конвекцией воздуха неэффективно при жарком климате и низком атмосферном давлении (например, на высоте над уровнем моря свыше 5 км, в том числе и на борту летательных аппаратов) и в герметичных конструкциях. Поэтому необходимо сочетать естественное охлаждение конвекцией с охлаждением кондукцией и излучением.

Для интенсификации естественного охлаждения необходимо уменьшать:

1. количество выделяемой элементом теплоты, определяемое его рассеиваемой мощностью;
2. температуру корпуса, контактирующего с окружающей средой;
3. тепловое сопротивление участка пути передачи теплоты от охлаждаемого элемента к корпусу.

Рекомендуется также:

- уменьшение пути теплопередачи;
- увеличение площади сечения, по которому происходит теплопередача;
- применение конструкционных материалов с высокой теплопроводностью;
- уменьшение шероховатости контактирующих поверхностей;

- увеличение контактного давления;
- применение в зазоре между контактирующими поверхностями различных теплопроводящих паст, пластических прокладок;
- окрашивать теплонагруженные элементы в темные цвета.

Системы естественного воздушного охлаждения надежны и экономичны, т.к. не требуют специального оборудования, создающего принудительное движение воздуха. Однако, как следует из таблицы, их эффективность чрезвычайно низка, и поэтому они применяются только при невысоких удельных тепловых нагрузках на аппарат.

Естественная конвекция является основным средством охлаждения герметичных аппаратов. В тех случаях, когда герметичность конструкции не является обязательным условием, целесообразно осуществлять перфорирование аппарата. Оптимальный коэффициент перфорации 0,2 – 0,25. При этом снижение перегрева элементов относительно окружающей аппарат среды достигает 20 – 30 % по сравнению с герметичной конструкцией. Перфорации могут быть различных видов: отверстия, жалюзи, сетки, грибки и т.п. Перфорации целесообразно располагать на горизонтальных поверхностях, отстоящих друг от друга на максимальном расстоянии, в идеале на крышке и дне аппарата. При этом для обеспечения возможности свободного подхода к аппаратуре охлаждающего воздуха дно аппарата должно быть приподнято над базовой поверхностью на 20 – 30 мм. В тех случаях, когда невозможно перфорировать дно или крышку аппарата, допускается перфорировать боковые стенки, но при этом перфорации следует располагать на расстоянии от дна или крышки не более чем на 1/4 высоты аппарата.

### **5.2.3.2. Принудительное воздушное охлаждение**

В настоящее время до 90 % современных конструкций РЭС оборудовано системами принудительного воздушного охлаждения с использованием вентиляторов (блоков вентиляторов). Основные причины применения принудительного воздушного охлаждения – наличие дешевого и доступного теплоносителя, относительная простота и надежность элементов системы охлаждения (вентиляторов, нагнетающих воздух, воздуховодов и т.п.).

На практике используются три системы принудительного воздушного охлаждения (рис. 5.6):

- приточная,
- вытяжная,
- приточно-вытяжная.

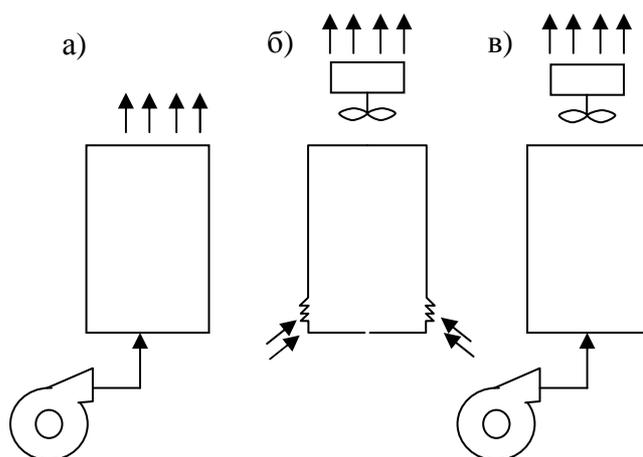


Рис. 5.6. Системы принудительного воздушного охлаждения:  
 а – приточная, б – вытяжная, в – приточно-вытяжная

Приточная вентиляция эффективнее вытяжной, поскольку воздух подается внутрь охлаждаемого устройства с повышенным давлением, что способствует улучшению теплоотдачи. Однако нагнетаемый воздух может уходить через неплотности в кожухе. Повысить напор охлаждающего воздуха можно в приточно-вытяжной системе охлаждения.

Системы принудительного воздушного охлаждения, несмотря на их высокую технологичность и низкую стоимость, имеют ряд недостатков: увеличиваются объем и масса конструкции в целом; требуются большие затраты мощности на охлаждение; высок уровень акустических шумов и вибраций и др. Кроме того, в последние годы в связи с ростом тепловой нагрузки все чаще при конструировании возникают ситуации, когда принудительное воздушное охлаждение вообще не в состоянии обеспечить необходимый тепловой режим. В этих случаях более эффективно принудительное жидкостное, воздушно-жидкостное или кондуктивно-жидкостное охлаждение.

### 5.2.3.3. Жидкостное охлаждение

Жидкостное охлаждение обладает по сравнению с воздушным следующими преимуществами:

- способностью отвести от аппаратуры значительно больше мощности;
- снизить объемы и массы устройств охлаждения и самих источников тепла;
- уменьшить уровень акустических шумов, создаваемых системой охлаждения;

- обеспечить более равномерное распределение температуры в пределах одного аппарата;
- создать большие запасы по охлаждению при пиковых нагрузках и переходных процессах и др.

Естественная жидкостная система охлаждения в принципе имеет только две модификации:

- аппарат погружается в жидкость;
- жидкость заливается в герметичный аппарат.

В первом случае резко снижается наружное тепловое сопротивление между корпусом аппарата и окружающей средой, во втором - внутреннее тепловое сопротивление. В обоих случаях общее тепловое сопротивление между тепловыделяющими элементами и окружающей средой уменьшается почти вдвое.

И тот и другой варианты обладают одним существенным недостатком - значительным увеличением массы изделия. Кроме того, в случае наружного охлаждения аппарата создаются трудности с доступом к нему, к подводу электрических кабелей, возрастают требования к герметичности узлов, соединителей и других элементов. Система с внутренней заливкой аппарата во многом лишена этих недостатков, но одновременно добавляется дополнительное требование - отсутствие какого-либо влияния охлаждающей жидкости на ЭРЭ, печатные платы, элементы коммутации и пр. Естественное жидкостное охлаждение практического значения не имеет.

Принудительное жидкостное охлаждение применяется очень широко. Конструктивное исполнение таких систем различно, но схема их работы примерно одинакова (рис. 5.7).

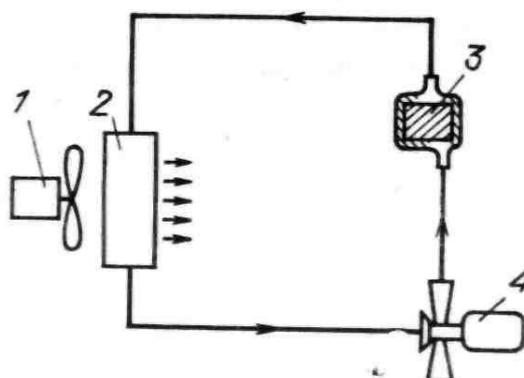


Рис. 5.7. Схема принудительного жидкостного охлаждения мощных генераторных ламп: 1 – вентилятор, 2 – жидкостно-воздушный теплообменник, 3 – генераторная лампа, 4 – электронасос

Тепловыделяющая часть прибора заключена в рубашку, в которую насосом под давлением подается охлаждающая жидкость. Для того чтобы обеспечить полный и равномерный контакт жидкости с тепловыделяющей поверхностью, внутри рубашки делается спиралевидная навивка. Нагретая в приборе жидкость поступает в охлаждающее устройство в виде жидкостно-воздушного теплообменника, охлаждается в нем и поступает обратно в насос. Для снижения размеров теплообменника он обдувается принудительным потоком воздуха от установленного рядом вентилятора.

Тип *охлаждающей жидкости*: дистиллированная вода; вода из водопроводной сети; антифриз-65; полиметилоксановые жидкости; 66 %-ный водный раствор этиленгликоля; раствор этилового спирта в воде и др.

Чисто жидкостные системы охлаждения эффективны лишь в том случае, если обеспечивается хороший тепловой контакт между источниками теплоты и охлаждающей жидкостью (теплоносителем). Поскольку создание таких разъемных тепловых контактов достаточно сложная конструктивная задача, наиболее часто используются смешанные воздушно-жидкостные или кондуктивно-жидкостные системы охлаждения.

В *воздушно-жидкостных* системах охлаждения отвод теплоты от блоков осуществляется как поступающим в стойку от вентиляторов воздухом, так и жидким носителем (чаще водой, реже фреонами, антифризами и т.д.), протекающим по трубам к охладителям. Охладители выполняются или в виде системы параллельных трубок, расположенных под каждым охлаждаемым блоком, или в виде направляющих для типового элемента замены (ТЭЗ). Для повышения эффективности охлаждения в таких конструкциях максимально используются возможности кондуктивного переноса теплоты от ТЭЗ к жидкому носителю. Чаще применяются замкнутые системы охлаждения, использующие теплообменники, насосы и другое оборудование, позволяющее экономить теплоноситель.

В *кондуктивно-жидкостных* системах охлаждения используется принцип параллельного охлаждения, когда каждый ряд элементов конструкции (источников теплоты) и даже каждый источник теплоты охлаждается отдельно. В этом случае обеспечиваются примерно равные температуры элементов конструкции за счет приблизительно одинакового кондуктивного теплового сопротивления от охлаждаемого элемента к теплоносителю.

#### **5.2.3.4. Системы испарительного охлаждения**

Является самым эффективным из рассматриваемых способов охлаждения. Испарительные системы существуют как разомкнутые (для охлаж-

дения аппаратуры, работающей короткое время), так и замкнутые (для аппаратуры, работающей в длительном режиме).

Принцип работы испарительной системы заключается в том, что под действием выделяемой в аппаратуре мощности жидкость испаряется, отнимая тепло от элементов. Далее пар поступает в теплосток в виде оребренного радиатора или теплообменника, где конденсируясь отдает тепло в окружающую среду или промежуточному теплоносителю. Конденсат стекает обратно, и цикл повторяется.

В РЭС в последние годы часто применяются устройства, основанные на принципе передачи тепла испарением. Одним из таких устройств является *термосифонный теплоотвод* (рис. 5.8).

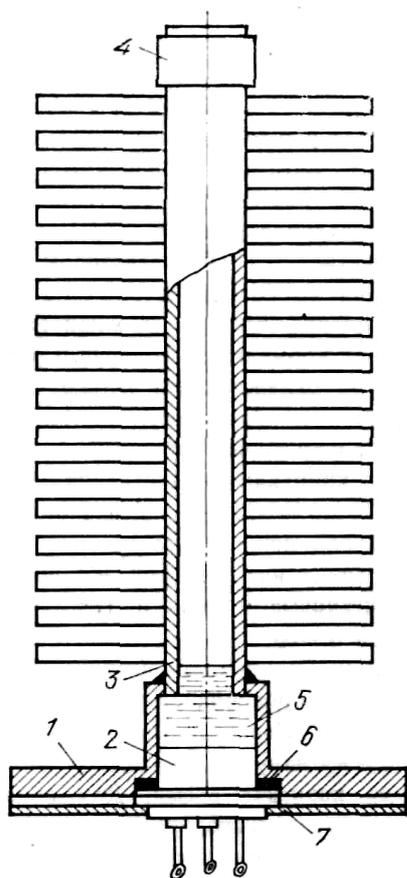


Рис. 5.8. **Конструкция термосифонного радиатора:** 1 – капсула, 2 – транзистор, 3 – радиатор, 4 – заправочный штуцер, 5 – жидкость, 6 – уплотнительная прокладка, 7 – фланец

Принцип его работы заключается в следующем. В вертикально установленную трубу заливается жидкость. К нижней части трубы крепятся тепловыделяющие элементы, подлежащие охлаждению. На верхней части трубы помещен конденсатор пара, выполненный, как правило, в виде оребренного радиатора. Под действием выделяемой элементом мощности жидкость в термосифоне испаряется, пар поднимается вверх, охлаждается

в радиаторе и конденсат стекает вниз. Вследствие того, что тепловое сопротивление потоку тепла при испарении очень мало, разность температур на противоположных концах трубы термосифона тоже мала. Следовательно, температура охлаждаемого элемента будет в значительной степени зависеть от температуры теплостока, т.е. в конечном счете, от его теплового сопротивления.

Наряду с высокой эффективностью применения термосифоны обладают и рядом крупных недостатков:

- они должны всегда устанавливаться вертикально;
- для работы термосифона необходимы гравитационные силы для обеспечения нормального возвращения конденсата.

Этих недостатков лишено устройство, называемое тепловой трубой.

*Тепловая труба* (рис. 5.9) представляет собой герметичный алюминиевый или стальной корпус (возможна различная форма), внутри которого помещается капиллярно-пористый фитиль, изготавливаемый из металлических и неметаллических сеток, стекла и металловолокон, металлокерамических порошковых материалов и т.п., а также жидкий теплоноситель (аммиак, вода, метанол и др.). Фитиль насыщается теплоносителем. Если на один конец тепловой трубы подается теплота, то носитель там испаряется и перемещается по трубе до тех пор, пока не конденсируется и превращается опять в жидкость в холодной части трубы. Затем за счет капиллярного эффекта теплоноситель по фитилю возвращается к горячему концу тепловой трубы. Тепловые трубы позволяют резко снижать тепловые сопротивления между охлаждаемыми элементами конструкции и окружающей средой.

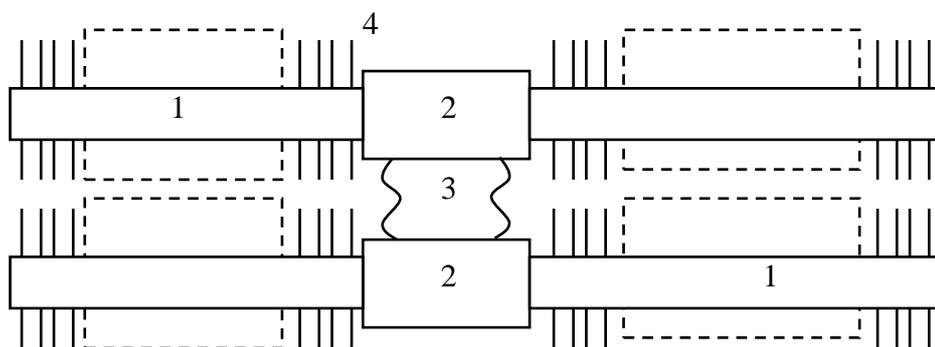


Рис 5.9. Принципиальная схема системы охлаждения тиристора с тепловой трубой: 1 – тепловая труба, 2 – зона подвода тепла, 3 – тиристор, 4 – ребрение в конденсационной трубе

## Тема 5.3 ЗАЩИТА РЭС ОТ ВЛАГИ

### 5.3.1. Защита элементов конструкции РЭС от влаги.

#### Механизм действия влаги на поверхность металлической детали

##### Механизм действия влаги на поверхность металлической детали.

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 возможное содержание влаги в воздухе зависит от температуры и давления. При снижении температуры влажного воздуха ниже уровня, соответствующего максимально возможному содержанию влаги (точке росы), избыток влаги выпадает в виде конденсата (росы).

Наличие влаги во внутренней среде гермокорпуса РЭС обусловлено следующими причинами:

1. проникновением ее через микропоры из внешней среды;
2. невозможностью полной осушки (без влагопоглотителя) среды заполнения (например, точка росы газообразного азота после централизованной осушки составляет – 70 °С);
3. наличием влаги в конструкционных материалах гермокорпуса.

*Механизм* взаимодействия влаги с материалами зависит от характера материала (органический, неорганический) и его способности поглощать (сорбировать) влагу или удерживать ее на поверхности (адсорбировать). Поглощение влаги обусловлено тем, что материалы содержат поры, значительно больше размера молекулы 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 влагу через капилляры или путем 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.

*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 ( $\text{tg}\delta$ ); уменьшением объемного сопротивления, электрической и механической прочности; изменением геометрических размеров и формы (короблением при удалении влаги после набухания); изменением свойств смазок. Это приводит к увеличению емкости (в т.ч. паразитной), уменьшению добротности контуров, снижению пробивного напряжения и появлению отказов РЭС.

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 ведет к увеличению шумов неразъемных и обгоранию разъемных контактов); уменьшению прочности и затруднению разборки крепежа; потускнению отражающих и разрушению защитных покрытий; увеличению износа трущихся поверхностей и т. д.

При замерзании сконденсировавшейся 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 ГИС.

### **5.3.2 Способы влагозащиты РЭС**

Для обеспечения надежности функционирования РЭС при воздействии влаги требуется применять влагозащитные конструкции, которые (рис. 5.10) разделяют на две группы: монолитные и полые.

От конструкции влагозащиты зависят такие параметры РЭС, как масса, габариты, стоимость, надежность; удобство ремонта, обслуживания, изготовления; возможность механизации и автоматизации производства. Сложность создания конструкции влагозащитной оболочки состоит также в том, что на нее часто возлагаются функции несущей конструкции, теплоотвода, защиты от электромагнитных воздействий и ионизирующих излучений, пыли, света, микроорганизмов.

*Монолитные* оболочки составляют неразрывное целое с защищаемым узлом. Монолитные пленочные оболочки имеют толщину от 0,2 до 20 мкм и используются в основном как технологическая защита бескорпус-

ных компонентов, подлежащих герметизации в составе блока, а также компонентов с улучшенными частотными свойствами (за счет уменьшения паразитных параметров внешних выводов). Монолитные оболочки из органических материалов, выполняющие функции несущих конструкций, изготавливают методами опрессовки, пропитки, обволакивания, заливки. Толстостенные монолитные оболочки могут выполнять и функцию несущей конструкции для внешних выводов.

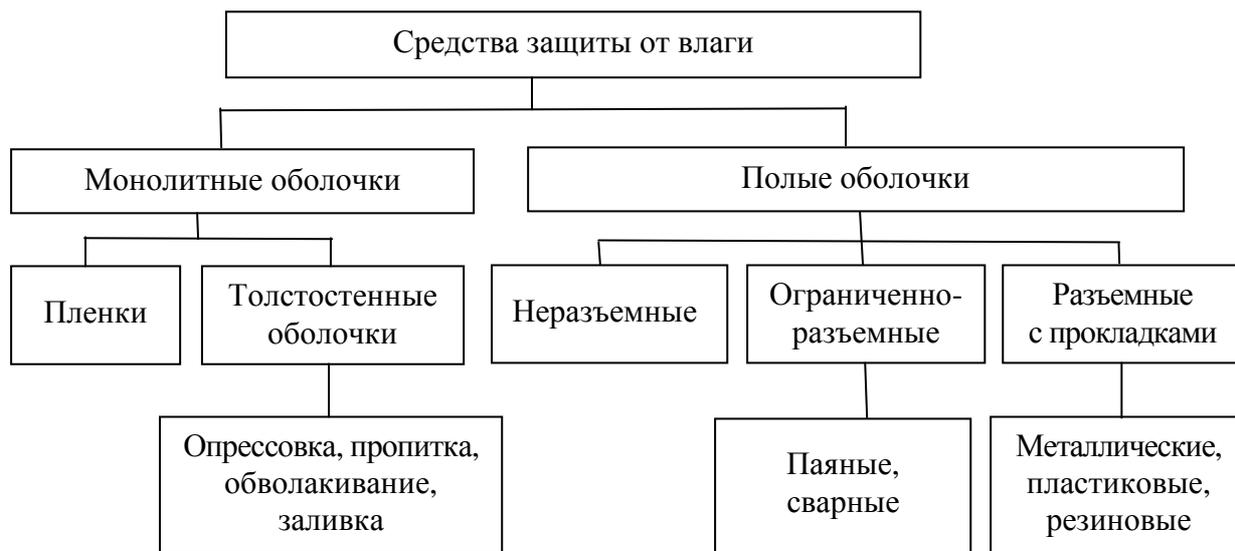


Рис. 5.10. Способы защиты РЭС от влаги

*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, позволяют улучшить теплоотвод (при использовании оболочек, теплопроводность которых выше теплопроводности полимеров). При использовании металлической оболочки из металлизированной керамики обеспечивается электромагнитное экранирование. При замене полимера воздухом ослабляются паразитные связи. Полые оболочки, особенно из неорганических материалов, обеспечивают более высокую надежность влагозащиты, но имеют значительные габариты, массу, стоимость.

Разновидности полых влагозащитных оболочек:

1. полимерные полые оболочки;
2. полые неразъемные металлополимерные оболочки;

3. полые неразъемные металлокерамические и металлостеклянные оболочки;
4. ограниченно-разъемные полые оболочки.

### **5.3.3. Защита конструкций РЭС от агрессивной внешней среды с помощью покрытий**

Во время эксплуатации РЭС подвергаются воздействию влаги, температурных колебаний, солнечной радиации, атмосферного давления, осадков, пыли, плесневых грибков и т.п.

Защита деталей РЭС от внешних воздействий может быть осуществлена покрытиями. При выборе покрытий учитывают назначение деталей, их материал, способ нанесения, внешний вид.

Покрытия могут *формироваться* следующими способами: химическими, гальваническими (электрохимическими), вакуумными.

Первые два широко используются при изготовлении печатных плат и несущих конструкций, а вакуумные - при формировании износостойких, антикоррозионных и специальных покрытий в микроэлектронике.

***Негальванические покрытия.*** К *металлическим* покрытиям относятся:

- вакуумное испарение практически любым металлом и почти на любые подложки (толщина слоя зависит от скорости и времени испарения вещества);
- катодное распыление (перенос металла с катода на анод при тлеющем разряде в газах);
- горячее распыление (расплавленный металл распыляется сжатым газом, толщина пленки от 30 мкм до нескольких миллиметров), которым можно нанести любое металлическое покрытие на поверхность любого материала.

К *немаллическим* покрытиям относятся лакокрасочные, которые используют для придания поверхности детали антикоррозионных свойств и красивого внешнего вида. К ним относятся лаки, краски, эмали. Лакокрасочные покрытия применяются для окраски корпусов, кожухов, панелей, шкал и т.д. Основой такого покрытия является органическое пленкообразующее вещество и пигмент. Лакокрасочное покрытие долговечнее металлического, однако его не следует применять для деталей, подвергающихся значительным механическим и химическим воздействиям (вибрация, из-

гиб, пайка, сварка). Перед нанесением покрытия поверхности металлических элементов обрабатывают по 4...6 классам. Лакокрасочные покрытия не применяются для деталей высокой точности, трущихся поверхностей, подверженных нагреву.

Покрытия разделяются на группы для различных макроклиматических районов и категорий размещения. Имеется семь классов покрытий (ГОСТ 9.032-74), высший класс – первый. По степени блеска покрытия делятся на глянцевые, полуглянцевые и матовые.

Технологический процесс нанесения лакокрасочных покрытий:

1. подготовка поверхности (очистка от загрязнений (химическая или механическая), обезжиривание);

2. грунтование – нанесение слоя грунта толщиной около 20 мкм. Основное назначение – создание адгезии между металлом и последующими слоями лакокрасочного покрытия. Грунт наносится распылением, окунанием или кистью (после нанесения каждого слоя – сушка);

3. шпатлевание – выравнивание загрунтованной поверхности. Шпатлевка – это пастообразная масса (пигменты, наполнители, лаки с добавкой).

Из лакокрасочных материалов, применяемых для окраски деталей РЭС, наибольшее распространение получили глифталевые (ГФ), эпоксидные (ЭП), пентафталевые (ПФ) и перхлорвиниловые (ХВ) эмали и лаки.

Примеры обозначения лакокрасочного покрытия: Эмаль ХВ-110 голубая; лак ФП-525 ТУ 6-10-1653-78.

**Химические покрытия.** К ним относятся оксидирование, пассивирование, фосфатирование, азотирование, анодирование.

*Оксидирование* бывает щелочное, бесщелочное и химическое. Щелочное оксидирование выполняется в горячих концентрированных растворах щелочей в присутствии различных окислителей (температура процесса 140-145 °С, время выдержки 60 – 90 мин в зависимости от процентного содержания углерода в стали). Бесщелочное (кислотное) оксидирование стальных деталей образует защитную пленку порядка 15 мкм из фосфатов кальция и оксидов железа. Химическое оксидирование алюминия и его сплавов ведут в растворах, содержащих щелочь и хроматы щелочных металлов. Оксидирование меди и ее сплавов происходит в щелочно-сульфатных растворах.

*Пассивированием* называется образование очень тонких оксидных пленок на цветных металлах с участием оксидов хрома. Пассивирование производят в подкисленном растворе хромпика.

*Фосфатирование* является химической реакцией, при которой происходит кристаллизация фосфатов на поверхности, причем в реакции участвует металл основания.

*Азотирование* состоит в насыщении поверхности стальных деталей азотом в потоке аммиака при температуре 500 – 650 °С.

*Анодированием* называется процесс образования оксидной пленки на поверхности алюминия и его сплавов в электролитах под действием тока. Это покрытие применяется для защиты от коррозии, для создания электроизоляционной пленки и повышения износостойчивости поверхностного слоя. Анодированные изделия могут окрашиваться в любой цвет органическими и специальными красителями.

**Гальванические покрытия.** Толщина покрытия выбирается в зависимости от материала покрытия: для бронзового, кадмиевого, латунного, никелевого, серебряного, хромового составляет от 1 до 60 мкм, для золотого, палладиевого, платинового и родиевого – от 0,25 до 12 мкм.

*Никелевое* покрытие характеризуется хорошими антикоррозионными свойствами. На черные металлы оно наносится обычно на подслои меди или никеля. В этом случае толщина покрытия составляет 0,5 – 0,6 мкм.

*Цинковое* покрытие имеет сравнительно низкую твердость и стойкость в атмосфере, насыщенной морскими испарениями. Применяется для черных металлов. Слой цинка выдерживает вальцовку и гибку, но плохо поддается сварке и пайке.

*Кадмиевое* покрытие устойчиво в морской воде. Защитные свойства кадмия, как и цинка, зависят от толщины покрытия, которая составляет 10 – 20 мкм. Кадмиевое покрытие по меди хорошо поддается пайке и применяется в условиях тропического климата.

*Серебрение* применяют для защитных целей, улучшения электропроводности и облегчения пайки, уменьшения переходного сопротивления контактируемых поверхностей. Серебрению подвергаются детали из меди и ее сплавов.

*Золочение* характеризуется высокой химической стойкостью в условиях повышенной влажности и агрессивных средах. Применяется для ответственных контактных деталей, изготовленных из меди и ее сплавов. Это покрытие очень мягкое. Для повышения твердости применяют золочение с добавкой 0,17 % никеля.

*Родирование* используется для защиты от коррозии ответственных наружных деталей, а также для предохранения от потускнения серебряных и никелевых покрытий. Эти покрытия обладают высокой твердостью, отражательной способностью и не окисляются на воздухе до 1100 °С.

Различают покрытия катодные и анодные. Если электродный потенциал металла покрытия более положительный, чем основного металла, то

покрытие называют катодным, если наоборот – анодным. Катодные покрытия защищают основной металл лишь механически, изолируя его от внешней среды, а анодные – и электрохимически. Продукты разрушения заполняют поры, и процесс разрушения замедляется.

В конструкторской документации на изделие указывается материал покрытия, его толщина, последовательность нанесения слоев. Пример обозначения медно-никелево-хромового покрытия: М24Н12Х (толщина меди – 24 мкм, никеля – 12 мкм, хрома – до 1 мкм).

Кадмиевое покрытие толщиной 3 мкм, с подслоем никеля толщиной 7 мкм, с последующей термообработкой, хромированное обозначается Н7.Кд3.т.хр.

### 5.3.4 Защита конструкций герметизацией

**Герметизация** является одним из наиболее эффективных методов защиты от климатических факторов. Она может быть полной или частичной.

*Частичной* герметизации подвергаются наименее стойкие к внешним воздействиям детали и узлы (например, трансформаторы, дроссели и др.). При этом кожух не является герметизирующим элементом. Основные методы частичной герметизации: пропитка, обволакивание, заливка, опрессовка. Основные электроизоляционные материалы: пропиточные лаки, компаунды, покровные лаки и эмали, пенопласт, пресс-материалы.

*Пропитка* заключается в заполнении пор, трещин, пустот в изоляционных материалах, а также промежутков между конструктивными элементами узлов электроизоляционными негигроскопичными материалами. Пропитке подвергаются многие детали и узлы ЭВМ, изготовляемых из волокнистых электроизоляционных материалов, являющихся пористыми и гигроскопичными. К таким узлам относятся намоточные изделия, каркасы катушек и др. Одновременно с повышением влагозащиты при пропитке достигается повышение механической прочности, нагревостойкости, диэлектрической прочности, теплопроводности и химической стойкости.

*Заливка* заключается в заполнении диэлектриком свободного промежутка между заливаемым изделием и стенками кожуха или заливочной формы.

*Обволакивание* – процесс покрытия изделия пленкой только снаружи. Нанесенный слой удерживается на поверхности в результате адгезии, которой должны обладать материалы, применяемые для обволакивания.

Полная герметизация достигается применением защитных корпусов из металла, керамики и других материалов. Она весьма эффективна для ап-

паратуры, устанавливаемой на летательных аппаратах. В этих случаях полная герметизация предохраняет не только от действия влаги и пониженного давления, но и исключает возможность электрического пробоя.

**Полная герметизация** может осуществляться следующими способами (табл. 5.2):

- сваркой основания и корпуса блока;
- паяным демонтируемым соединением корпуса (основания) с крышкой (кожухом) блока;
- уплотнительной прокладкой.

Таблица 5.2

**Рекомендации по выбору вида герметизации**

Объем герметичного блока, дм <sup>3</sup>	До 0,5	0,5 – 5		Более 3
Вид герметизации	Неразъемная	Демонтируемая		Разъемная
Способ выполнения уплотняющего стыка	Сварка	Демонтируемая сварка	Демонтируемая пайка	Применение уплотнительных прокладок
Скорость натекания газа $V_H$ , дм <sup>3</sup> Па/с	$1,33 \cdot 10^{-10}$	$1,33 \cdot 10^{-7}$		$1,33 \cdot 10^{-4}$

Выбор способа герметизации определяется требованиями, предъявляемыми к блокам в зависимости от условий эксплуатации, габарита (объема) блока, а также материалов, используемых в корпусе и в основании блока.

Герметизацию с помощью *сварки* применяют для блоков, объем которых не превышает 0,5 дм<sup>3</sup> и не подлежащих ремонту. Вскрытие таких блоков возможно только с помощью механического снятия сварного шва (рис. 5.11), что влечет за собой обязательное попадание металлической пыли на бескорпусные элементы и соответственно их отказ. Этот способ герметизации широко используется для герметизации корпусов ИС и микросборок и обеспечивает степень натекания  $V_H = 10^{-9}$  л·мкм /с.

Герметизация с помощью *паяного демонтируемого соединения* (рис. 5.12) применяется для блоков, объем которых лежит в пределах 0,5 – 5 дм<sup>3</sup>. Этот способ обеспечивает степень натекания  $V_H = 10^{-6}$  л·мкм /с, что гарантирует работоспособность блока.

Герметизация с помощью *уплотнительных прокладок* (рис. 5.13) применяется для блоков, объем которых превышает 3 дм<sup>3</sup>. В качестве уплотняющих прокладок используют резину, отоженную красную медь,

алюминий, свинец. Блоки меньших объемов герметизировать данным способом нецелесообразно из-за больших потерь на элементы крепления. Способ обеспечивает скорость натекания  $V_H = 10^{-3}$  л·мкм /с.

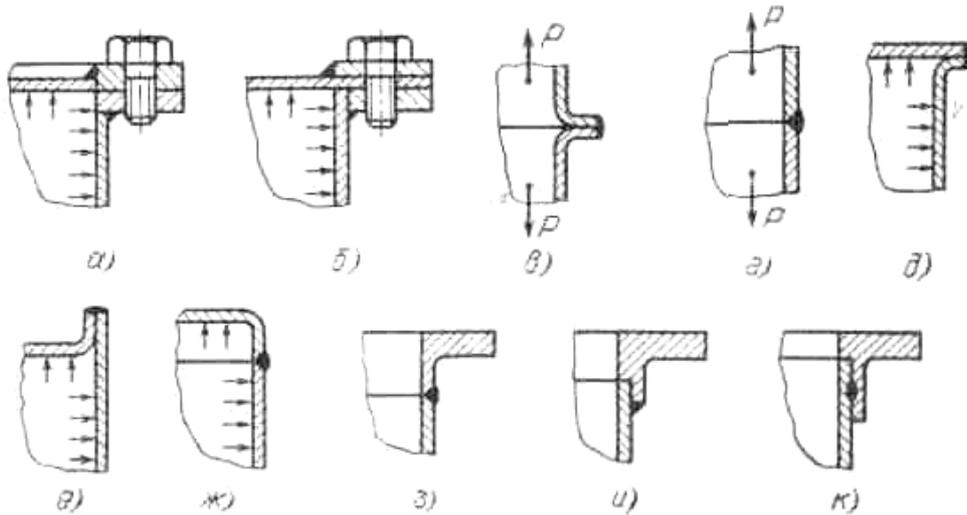


Рис. 5.11. Конструкции сварных корпусов

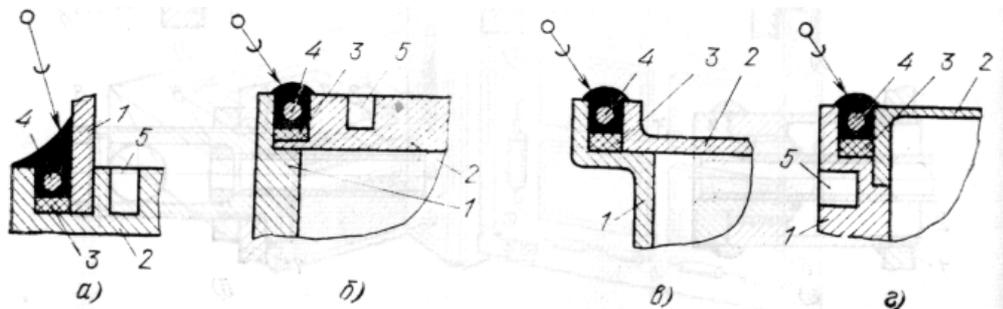


Рис. 5.12. Рекомендуемые варианты паяных демонстрируемых соединений:  
1 – корпус блока, 2 – крышка, 3 – прокладка уплотнительная, 4 – проволока,  
5 – теплоотводящая канавка

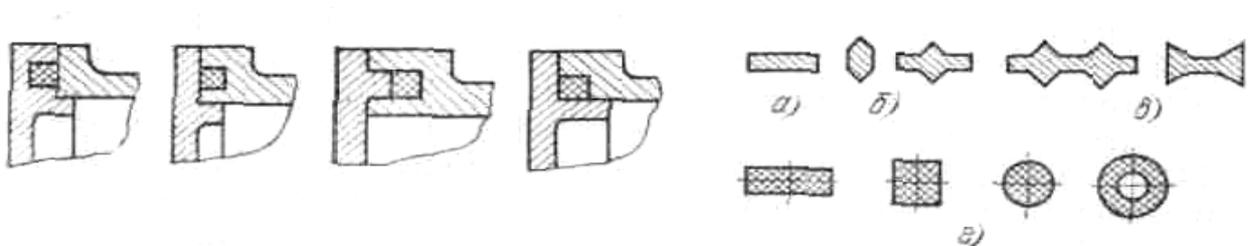


Рис. 5.13. Конструкции уплотняющего стыка и сечения металлических и резиновых уплотняющих прокладок

## Раздел 6

### КОНСТРУИРОВАНИЕ РЭС

#### Тема 6.1

#### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СОЕДИНИТЕЛИ

##### 6.1.1. Контакты электрических соединителей

*Контактами* называют токоведущие детали устройств, обеспечивающие коммутацию электрических цепей. Контакты используются в переключателях, разъемах, потенциометрах и реле. По условиям работы контакты подразделяют на высокочастотные и низкочастотные, слаботочные и сильноточные. Контакты работают попарно, а их соприкасающиеся поверхности оформляют в виде цилиндров, плоскостей и сферы. В РЭС широко используют слаботочные и ограниченно-сильноточные контакты. *Слаботочные* контакты для токов от долей до единиц ампер изготавливают обычно из благородных и тугоплавких металлов, преимущественно серебра, платины, палладия, золота, вольфрама и сплавов на их основе типа твердых растворов, в том числе дисперсионно-твердеющих и диффузионно-окисленных. Например, контактный сплав СрМ960 состоит из 96 % серебра и 4 % меди и имеет удельное сопротивление 0,018 мкОм·м. Основные эксплуатационные параметры контактов: переходное сопротивление (обычно 0,01 – 0,03 Ом); емкость между контактами (для высокочастотных узлов должна быть не более 1 – 2 пФ); срок службы - от нескольких тысяч до нескольких миллионов переключений.

*Сильноточные* контакты для токов от единиц до сотен ампер используются в электромеханических и других устройствах. Их изготавливают из спеченных псевдосплавов, состоящих из двух и более компонентов, из которых один обладает значительно большей тугоплавкостью, а другой большей электро- и теплопроводностью. Тугоплавкие компоненты из окиси кадмия, никеля, вольфрама повышают износостойкость, термическую стойкость и препятствуют свариванию контактов друг с другом. В качестве электропроводного компонента используют серебро и медь. Например, контактный материал КМК-А10м состоит из 85 % серебра и 15 % окиси кобальта и имеет удельное сопротивление 0,028 мкОм·м. Материал СВ50Н2, состоящий из 40 % серебра, 50 % вольфрама и 2 % никеля имеет удельное сопротивление 0,041 мкОм·м.

При электрическом монтаже устройств используют *лепестки*. Простейшие конструкции их приведены на рис. 6.1 Основное требование к лепесткам: малое электрическое сопротивление, достаточная механическая прочность и хорошая паяемость контактных площадок лепестков. Лепестки изготавливают из меди и сплавов на ее основе.

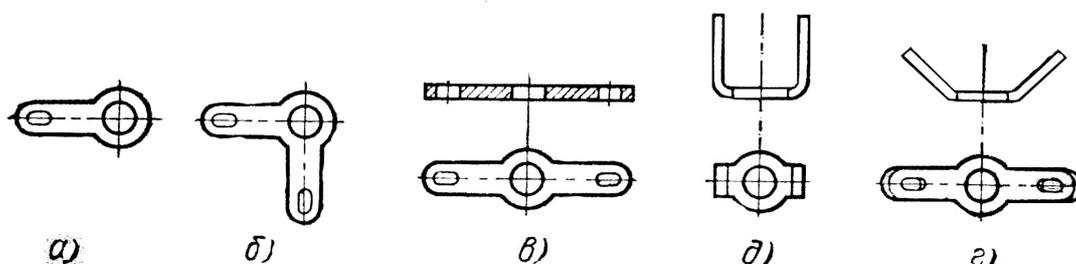


Рис. 6.1. Контактные лепестки

В коммутационных устройствах РЭС надежный электрический контакт обеспечивается, если контактные детали имеют хорошую электропроводность, теплопроводность, износостойкость и коррозионную стойкость. Эти характеристики контактов обеспечивают выбором материала и процесса их изготовления. При малых разрывных токах для изготовления контактов применяют серебро, т.к. контакты из серебра имеют малое переходное сопротивление, почти не изменяющееся в процессе эксплуатации. При большой частоте разрыва цепей с малыми токами используют дугоустойчивые и износостойкие контакты их вольфрама, палладия, платины и их сплавов. Для различных условий эксплуатации используют золото, платину, палладий, родий, иридий и их сплавы.

При изготовлении контактов их поверхность, замыкающая электрическую цепь, должна быть коррозионно- и электроэрозийноустойчивой. Для экономии драгоценных и дефицитных материалов применяют биметаллические материалы.

### 6.1.2. Виды электрических соединений в конструкциях РЭС

Цель электрических соединений в конструкциях РЭС (т.е. электро монтажа) – обеспечить электрические сигнальные связи между входными и выходными цепями конструктивных модулей различного иерархического уровня, а также подвод к ним напряжений питания и земли для нормальной работы изделий.

Выделяют несколько уровней коммутации электрических соединений: ячеечный монтаж (монтаж ИМС и ЭРЭ на печатные платы); внутри-

блочный монтаж (объединение ячеек на объединительных платах и т.п.); межблочный монтаж; межрамный монтаж; межстоечный монтаж и т.д.

Трудоемкость электромонтажных работ составляет до 50 % и более всей трудоемкости изготовления изделий, а электрические соединения – от 3 до 15 % физического объема изделий. Конструкции электрических соединений во многом определяют надежность функционирования и другие показатели качества РЭС. По экономическим причинам при разработке РЭС стремятся как можно большее число электрических соединений разместить на уровне конструктивных модулей низшей иерархии (ИМС, печатных плат и т.п.).

Конструктивно-технологическая реализация электрических соединений между модулями и элементами подразделяется на две основные части: создание *межконтактных* соединений (линии связи модулей) и *контактирование* (контактные соединения).

Межконтактные соединения в конструкциях РЭС выполняются в основном двумя способами: с помощью печатных плат (печатный монтаж) и объемными проводами (кабелями, жгутами, свитыми парами проводов, одиночными проводами).

Особенно широко используются плоские опрессованные кабели марок КПВР, КППР, КППРО, ПВПмс, ППРО и др., ленточные плетеные марок ЛФ, ЛФЭ и тканые марок ЛКТ, МЛКТ и др. Для выполнения объемного монтажа применяются одиночные монтажные провода марок МНВ, МГШВ, МГШВЭ, МГТФ, МГТФЭ, РКГМ, МОГ, Ф и др.

Применяемые *контактные соединения* конструктивных модулей можно разделить на постоянные, полупостоянные и временные. Постоянные соединения не позволяют демонтировать из конструкции модули без разрушения их выводов (например, сварные соединения). В полупостоянных соединениях (например, паяных либо полученных накруткой, обжимкой и т. п.) разрушения выводов при демонтаже не происходит, однако для демонтажа модулей требуются специальные инструменты. К временным соединениям относятся соединения, получаемые с помощью разъемных соединителей, розеток и т.п.

Для получения временных контактных соединений широко применяются разъемные соединители – конструктивно законченные электротехнические изделия, предназначенные для разъемного электрического и механического разъединения электрических цепей и состоящие из двух и более частей (вилки, розетки), образующих разъемное контактное соединение. Отличительной особенностью разъемов по сравнению с другими коммути-

рующими устройствами является быстрое разъемное соединение или разъединение большого количества электрических контактных соединений.

*Разъемные соединители* характеризуются совокупностью электрических, электромеханических и конструктивно-технологических параметров. К электрическим параметрам обычно относят допустимую рабочую частоту, переходное контактное сопротивление и его нестабильность, рабочие напряжения и токи, сопротивление и электрическую прочность изоляции. К электромеханическим параметрам относят усилие сочленения соединителя, а к конструктивно-технологическим – габаритные размеры, массу, удобство эксплуатации, надежность, износостойчивость, а также другие конструктивно-технологические особенности (количество контактов и рядов, шаг контактов, плотность монтажа выводов, вид хвостовика, конструкции соединителя (под пайку, накрутку, обжимку и т. п.), наличие ловителей, фиксирующего замка, корпуса и др.)

Выбор тех или иных разъемных соединителей для конструктивных модулей РЭС осуществляется с учетом высокой надежности электрических соединений, малых габаритных размеров и массы, рациональной компоновки ИМС, условий эксплуатации.

Для монтажа корпусных ИМС и БИС на печатных платах в изделиях с повышенной плотностью упаковки используются переходные соединительные розетки, позволяющие увеличивать ремонтпригодность конструкций ячеек и модулей. Серийно выпускаются розетки типа РС, предназначенные для установки и подключения ИМС в корпусах типа 2 (ГОСТ 17467-79) и имеющие выводы для соединения с печатной платой.

При соединении печатных плат конструктивных модулей РЭС на объединительных панелях обычно применяются либо краевые с печатной вилкой (прямого сочленения), либо двухкомпонентные (косвенного сочленения) разъемные соединители.

Наиболее часто используются при прямом контактировании «печатная плата – розетка» разъемные соединители типа СНП17, ОНП-НГ-14, РПП72 и др.

Широко применяются разъемные соединители косвенного контактирования типа СНП34, СНП58, СНП59, СНО47, СНО53, СНО58, СНО59, СНО66, ОНП-КГ-56, ГРПМ1, ГРПМ2, ГРПМ3, РП10, РП14, РП15, РПС-37, РПКМ и др.

Электрические соединения ячеек в блоках (внутриблочная электрическая коммутация) выполняются с помощью разъемных электрических соединителей, объединительных плат, переходных контактов, гибких шлейфов, плоских кабелей и монтажных проводов. Элементы электриче-

ских соединений ячеек выбирают в зависимости от эксплуатационных требований варианта конструкции ячейки (разъемная, книжная), конструктивно-технологических требований, габаритных размеров соединителя, а также от необходимого числа контактов в электрическом соединителе.

В блоках разъемной конструкции применяют разъемные электрические соединители. Они обеспечивают достаточно надежное электрическое соединение и многосъемность ячеек в блоке. Соединительные платы и переходные контакты используются в ячейках и кассетах, к которым предъявляются требования обеспечения высокой надежности электрических соединений малых габаритов и массы и не предъявляется требованием легкосъемности. Гибкие шлейфы и плоские кабели, применяющиеся для внутриблочного монтажа в блоках книжной конструкции, позволяют более рационально использовать объем блока, уменьшить его габариты и массу, снизить трудоемкость монтажа путем применения групповых методов пайки и повысить надежность электрических соединений.

В зарубежных конструкциях модулей ЭВМ для выполнения внутриблочных и межблочных электрических связей в настоящее время используются как краевые, так и двухкомпонентные разъемные соединители. Краевые разъемные соединители, выпускавшиеся ранее с шагом размещения контактов 1,27 мм (8 контактов на сантиметр), заменяются сейчас либо краевыми с повышенным шагом размещения контактов 0,635 мм (от 16 до 20 контактов на сантиметр), либо двухкомпонентными, изготавливаемыми в соответствии с европейским стандартом DIN 41612, где плотность контактов по краю составляет 11 контактов на сантиметр.

В соединителях с «нулевой силой вставки» типа ZIF (Zero-insertion-force) контактными парами управляют кулачковые механизмы, обеспечивающие легкое скольжение контактов друг по другу во время их прикосновения. При пути скольжения до 1 мм обеспечивается надежный электрический контакт при любой нормальной силе более 1,5 Н. Соединители типа ZIF могут быть выполнены как двухкомпонентными, так и краевыми. Некоторые современные конструкции соединителей типа ZIF допускают боковую вставку печатных плат.

Развитие методов технологии монтажа элементов на поверхность печатных плат привело к использованию в конструкциях специальных ТМП-соединителей, пригодных для автоматизированной сборки ячеек. Микроминиатюрные ТМП-соединители имеют корпуса из высокотемпературных термопластичных материалов и выпускаются с шагом расположения выводов 2,54; 1,27; 0,635 мм. Они монтируются как на одной, так и на обеих сторонах

платы. В отличие от соединителей, выводы которых обычно запаиваются в металлизированные отверстия плат, в ТМП-соединителях выводы припаиваются к контактными площадкам платы. Для точного совмещения контактов соединителя с контактными площадками платы в конструкциях ТМП-соединителя имеются ориентирующие элементы (обычно литые выступы).

Для электрических соединений печатных плат в отечественных и зарубежных конструкциях ЭВМ используются также эластомерные накладные соединители, в конструкцию которых входят эластомерные пластины, которые прижимают контактные площадки печатной платы к контактными площадкам гибкой печатной платы или кабеля, создавая газонепроницаемые соединения. Эластомер, имеющий малую остаточную деформацию сжатия, действует как пружина, обеспечивая постоянное усилие прижатия контакта. Вся эта конструкция зажимается между двумя опорными пластмассовыми пластинами с помощью винтов. Эластомерные соединители с шагом размещения контактов 2,54 мм обеспечивают плотность выводов примерно 15 контактов на сантиметр, а с шагом 1,27 мм – 25 – 47 контактов на сантиметр. Кроме того, к достоинствам такого соединителя относятся высокая надежность электрических соединений, малая высота корпуса, относительная простота сборки и разборки.

## Тема 6.2

### ЭРГОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ИХ УЧЕТ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РЭС

#### 6.2.1. Основы учета психофизиологических факторов при разработке РЭС

От согласования характеристик машин и возможностей человека зависит производительность промышленного труда. С усложнением техники возрастают психофизиологические нагрузки на человека-оператора. При этом часть не всегда возможно часть человеческих функций передать машине ввиду различия возможностей человека и ЭВМ. *Человек и машина должны дополнять друг друга* по своим возможностям. Если при совместной работе параметры машины не соответствуют параметрам человека, то повышается его утомляемость, растет число ошибок и травм.

Установлением взаимосвязи параметров человека и машины занимается *эргономика* (от греч. *ergon* - работа, *nomos* - закон) и ее раздел - инженерная психология.

Человек, машина и среда рассматриваются в эргономике как сложное, функциональное целое, в котором ведущая роль принадлежит человеку. Объектом изучения инженерной психологии, в частности, являются сенсорный вход (органы чувств), моторный выход (двигательный аппарат) человека-оператора, процессы переработки информации в нормальных и критических условиях его жизнедеятельности.

*Эргономические показатели конструкции делятся:*

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

*Эргономические показатели* человека служат для оценки согласованности его возможностей с требованиями, обусловленными особенностями техники и средой обитания. Рабочее место (зона, оснащенная необходимыми техническими средствами) должно быть приспособлено для конкретного вида труда и для работников определенной квалификации. Надежность работы операторов в значительной степени зависит от оптимальных значений *гигиенических показателей*.

*Антропометрические* показатели определяют положение элементов индикации и управления, размеры пульта, размеры и форму рабочего кресла. Антропометрические показатели изменяются во времени и различаются в зависимости от пола, возраста, профессии, национальности человека-оператора.

К *физиологическим показателям* относятся силовые параметры различных органов движения человека (табл. 6.1).

Таблица 6.1

**Сила мышц рук оператора, Н**

Группа мышц	Мужчины	Женщины
Мышцы кисти руки:		
правой	380	220
левой	360	200
Мышцы большого пальца руки:		
правой	120	90
левой	100	80

К психофизиологическим показателям относятся скорость и темп движений частей тела, характеристики зрения. Эти показатели необходимо учитывать при выборе конструкции элементов управления (ручек, кнопок, тумблеров и т.д.), элементов индикации (цифровых табло и пр.). Так, среднее время вращательного движения руки с преодолением сопротивления составляет 0,72 с, а без преодоления сопротивления - 0,22 с.

Самыми важными психофизиологическими показателями человека являются характеристики зрения, т.к. с помощью зрения человек получает 80...90 % всей информации. Глаз способен воспринимать электромагнитные излучения длиной волны  $\lambda = 300... 700$  нм. Человеческий глаз имеет различную чувствительность в светлое и темное время суток (рис. 6.2).

Цвет ассоциируется у человека с понятием тепла и холода, приближения и отдаления, легкости и тяжести. Разные цвета оказывают разное физиологическое воздействие. Кроме цвета глаз реагирует на яркость и контраст. Диапазон яркостей, при котором возможна работа глаза: от  $10^{-4}$  до  $10^8$  кд/м<sup>2</sup>. Оптимальная яркость фона, при которой отмечается наибольшая разрешающая способность зрения, составляет  $10^4$  кд/м<sup>2</sup>. Рекомендуемые соотношения яркостей: 2:1 - между рабочим полем и ближним фоном; 10:1 - между рабочим полем и дальним фоном; 50:1 - между самым светлым и самым темным пятнами, попадающими в поле зрения.

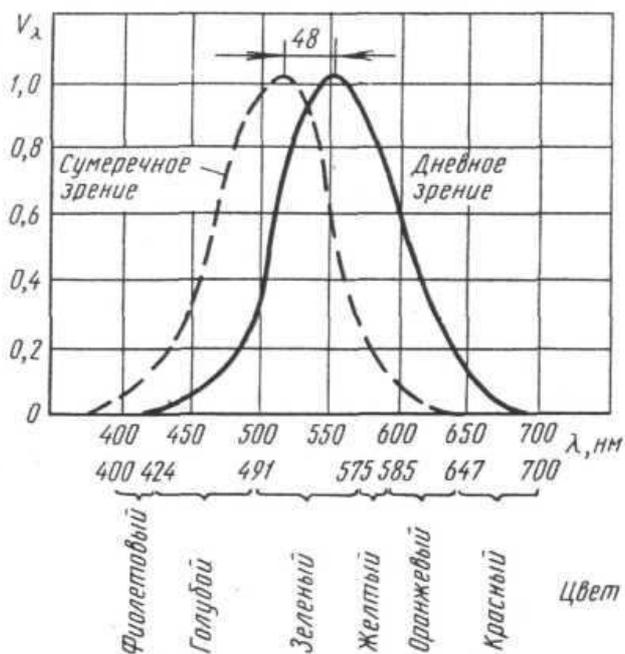


Рис. 6.2. Относительная чувствительность глаза для дневного (колбочки) и сумеречного (палочки) зрения

Наибольшей разрешающей способностью по цвету отличаются следующие комбинации при восприятии знаков: синий на белом, черный на желтом, зеленый на белом, черный на белом, зеленый на красном, красный на желтом.

Реакция глаз характеризуется полем зрения (рис. 6.3), скоростью ориентации в поле зрения, остротой зрения, аккомодацией, адаптацией, стробоскопичностью, стереоскопичностью.

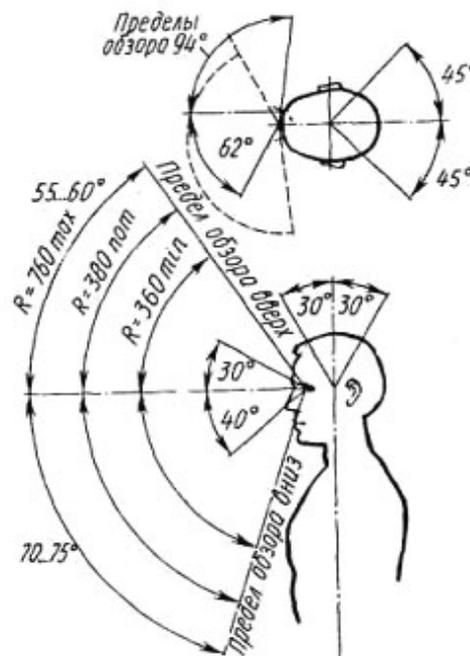


Рис. 6.3. Поле зрения человека и зона доступности элементов управления и индикации:  $R$  - радиус, определяющий границы зоны доступности руками человека-оператора

Тактильная чувствительность (способность воспринимать механические раздражения кожи) обеспечивает распознавание оператором элементов управления по форме и размерам на ощупь.

При проектировании рабочего места учитывают время реакции (латентный период) того или иного органа восприятия сигналов (табл. 6.2). При увеличении уровня сигнала ( $x$ ) время реакции может уменьшиться в несколько раз.

Таблица 6.2

**Время реакции на отдельные сигналы**

Анализатор	Латентный период, с
тактильный	0,09 ... 0,22
слуховой	0,12 ... 0,18
зрительный	0,15 ... 0,22
обонятельный	0,31 ... 0,39
температурный	0,28 ... 1,6
вестибулярный	0,4
болевой	0,13 ... 0,89

К психологическим относится показатель соответствия изделия возможностям восприятия и переработки информации человеком, а также вновь формируемым навыкам.

### **6.2.2. Обеспечение эстетических качеств РЭС**

Техническая эстетика занимается вопросами реализации требований эргономики художественными средствами, рассматривает основополагающие методы и принципы художественного конструирования, проблемы стиля и мастерства. Особенностью конструирования современных РЭС является усиление требований инженерной психологии и технической эстетики ввиду широкого использования в конструкции РЭС пластмасс, дающих конструктору большую свободу выбора цвета и формы изделия. Все больше внешний вид и габариты РЭС зависят от элементов управления и индикации (ввиду уменьшения размеров панели управления).

При разработке внешнего оформления конструкции РЭС наиболее важно учесть различные ограничения: социально-экономические, эргономические, конструктивные, технологические.

К социально-экономическим факторам относятся: обеспечение общественно-необходимых потребностей, ориентация на конкретную группу потребителей, устранение дублирования функций в различных устройствах (радиоприемник, магнитола), унификация, экономия материальных и трудовых ресурсов, конкурентоспособность, обеспечение сбыта, патентоспособность.

Художественное оформление изделия зависит от его назначения – профессиональная аппаратура, бытовая аппаратура индивидуального или коллективного пользования. При художественном конструировании обязательно должна учитываться социальная группа потребителей: женщины, космонавты, военнослужащие, врачи, дети и т.д.

*Качество художественного оформления РЭС* (его композиции) характеризуется соотношением красоты и пользы (формы и содержания), т.е. гармоничностью (от греч. harmonia - связь); это стройность, соразмерность частей; слияние различных компонентов объекта в гармоничное целое (изделие).

*Форма в художественном конструировании* отражает все качества конструкции: технологичность, рациональность компоновки, удобство эксплуатации и обслуживания, эстетическую выразительность и т.д. Она обладает рядом свойств: объемно-пространственной структурой, геометричностью строения (поверхности, грани, ребра, точки), весомостью, прочностью, массивностью, плотностью, динамичностью, цветовым и световым колоритом. Одной из важнейших характеристик формы является ее целостность,

определяющая возможность мгновенной оценки структуры и качества изделия. Из потока неупорядоченной информации человек может воспринять за секунду не более 3...5 бит. Это значит, что число членений формы должно быть не более 8... 32 ( $2^3...2^5$ ). При приеме организованной (осмысленной) информации человек может воспринять за секунду 15... 20 (до 50) бит.

*Объемно-пространственная* структура характеризует взаимодействие формы и ее элементов между собой и с окружающим пространством. Различают следующие конструкции: плоскую (фронтальную), объемную, глубинно-пространственную. Типичный пример плоской конструкции - лицевые панели, характерным признаком которых является взаимное расположение элементов плоской и пространственной формы по двум координатам. Объемную конструкцию представляет форма изделия в целом, которая характеризуется распределением объемов и масс по трем координатам. Все три измерения в композиционном отношении одинаково важны. Глубинно-пространственная структура учитывает размещение одних объектов среди других объектов комплекса и достигается с помощью выбора пропорций и масштаба.

Важная категория композиции - *цветовая гармония*; она реализуется с учетом требований эргономических характеристик зрения. Умело сочетая те или иные цвета, можно создать впечатление легкости и тяжести, холода и тепла, простора и тесноты, выступления и отступления элементов и узлов изделия. Цвет необходим для выделения нужных деталей (наиболее важных клавиш, элементов, находящихся под высоким напряжением и т.д.). Цвет является средством эстетического воздействия, влияет на настроение, поднимая и понижая эмоциональный (линий, клавиш, знаков и т.д.). Ритм сообщает конструкции статическое или динамическое выражение, он способствует ее более четкому зрительному восприятию. Метр ассоциируется с равномерным движением. Динамичности достигают, например, изменяя шаг, толщину или одновременно шаг и толщину линий (см, а также вводя кривые линии с изменяющейся кривизной (рис. 6.6, б). Линии, имеющие меньший радиус кривизны, отражают более напряженный (динамичный) ритм.

### **6.2.3. Особенности внешнего оформления профессиональных и бытовых РЭС**

С точки зрения специфики внешнего оформления все РЭС удобно разделить на профессиональные и бытовые. При конструировании профессиональных РЭС в большей степени учитываются эргономические параметры, а при конструировании бытовых РЭС - эстетические качества.

Человек-оператор при работе на профессиональных РЭС выполняет свои функции на *рабочем месте*. При эргономическом конструировании рабочего места необходимо учитывать: рабочую позу человека-оператора (сидя, стоя, стоя/сидя); потребность оператора в обзоре рабочего места, а также соседних рабочих мест; наличие рабочей поверхности для письма, установки телефонных аппаратов, хранения документов, наличие пространства для ног при работе сидя; конфигурацию и размеры индикаторов и органов управления; приоритет, последовательность и темп поступающей информации.

Размеры рабочего места, его организация и утомляемость оператора зависят от позы. Если затраты энергии при работе сидя в прямой позе принять равными единице, то выполнение той же работы стоя требует затрат энергии в 1,6 раза больше, сидя в наклонной позе - в 4 раза, стоя в наклонной позе - в 10 раз больше.

Работая на профессиональных РЭС, в общем случае оператор выполняет диспетчерские функции: наблюдение за поступлением информации, переработка информации и принятие решений, исполнение принятых решений. Пространство для размещения бумаги и пишущих принадлежностей должно быть от 100 до 200 мм в глубину, если предполагается, что оператор будет делать заметки. Для выполнения записей и установки телефона и документов этот размер следует увеличить до 400 мм.

Основным требованием является размещение элементов индикации на линии, проходящей через ось глаз в соответствии с наклоном головы оператора. При расположении индикаторов следует учитывать их приоритет (роль при достижении цели; цена ошибки оператора; частота использования; срочность использования информации; надежность работы индикаторов). Наиболее приоритетные индикаторы располагают прямо перед оператором, менее важные - сбоку слева, еще менее важные - сбоку справа. Следует также учитывать: идентичность информации; логическую связь между сообщениями; совместное использование индикаторов; соответствие размещения индикаторов и технических устройств, работа которых отображается соответствием навыкам оператора.

Чтобы облегчить обнаружение отклонения одного из параметров группы индикаторов, их указатели в нормальном режиме следует устанавливать в одинаковом положении. Для концентрации внимания операторов элементы индикации могут быть объединены в логические блоки рамкой или их расположению может придаваться динамический характер, например путем сужения поля в месте максимальной информативности (внизу экрана).

Эффективность выполнения операций управления в значительной степени зависит от конструкции органов управления и характера их раз-

мещения друг относительно друга и относительно органов индикации. Панель органов управления имеет наклон к горизонтальной плоскости от 15 до 3°. Органы управления должны находиться в пределах досягаемости рук человека (рис. 6.4).

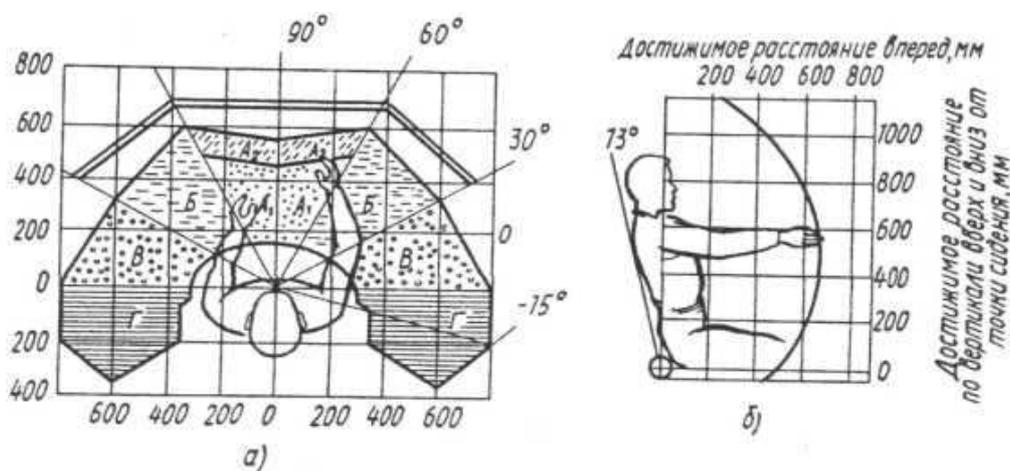


Рис. 6.4. Зоны досягаемости панели управления в горизонтальной (а) и в вертикальной (б) плоскостях

Органы управления РЭС делятся по своему назначению на исполнительные (кнопки, тумблеры, клавиши) и регулировочные (ручки, переключатели, клавиши). К элементам управления предъявляются требования быстроты передачи информации от оператора, надежности работы, эстетичности, технологичности конструкции. По конструктивной реализации разделить элементы управления целесообразно на управляемые одним пальцем (нажимные, передвижные) и двумя и большим числом пальцев (поворотные, многооборотные, рычажные).

Ориентировочные параметры ручек: диаметр 4...8 (до 70) мм, высота 12...20 мм, требуемое оптимальное усилие 3...4 Н, максимальное до 25 Н. Конструкция тумблеров зависит от выполняемых ими функций. Допустимое усилие переключения не должно превышать 3...5 Н, а длина рычага - 3...15 мм. В РЭС наиболее применимы кнопки четырехугольной формы с закругленными углами или закругленной кромкой. Диаметр (диагонали) кнопок выбирают исходя из длины и ширины пальцев в пределах 8...30 мм. Усилие нажатия часто используемых кнопок должно составлять 1...6 Н, редко используемых и наиболее ответственных кнопок 6...12 Н, глубина утапливания кнопок 2...5 и 6...12 мм соответственно. Чем быстрее и чаще оператору приходится работать с кнопками, тем большие размеры они должны иметь. Иногда, например, на корпусе ручных электронных часов, кнопки имеют значительно меньшие размеры.

При установке тумблеров и кнопок следует руководствоваться следующими соображениями: установка в горизонтальные ряды целесообразнее установки в вертикальные ряды, так как в первом случае уменьшается вероятность ошибки; рычаги тумблеров в любом рабочем положении и кнопки должны находиться на расстоянии не менее 20...35 мм друг от друга.

Целостность панели управления РЭС достигается благодаря умелому использованию соподчиненности второстепенных элементов главным, пропорциональности и масштабности. Для лицевой панели РЭС ведущим является ее фон, ведомыми - шкалы, индикаторы, кнопки, тумблеры, переключатели, ручки и т. д. Среди ведомых можно выделить наиболее значимые элементы. Пропорции в вертикальном направлении являются более значимыми, чем в горизонтальном. Основным средством достижения пропорциональности является геометрическое подобие на основе использования рядов: арифметических ( $H_1 - H_2 = H_2 - H_3$ ), геометрических ( $H_1:H_2 = H_2:H_3$ ), гармонических ( $H_1:H_3 = (H_1 - K_2)/(H_2 - H_3)$ ) и др. Пропорции, основанные на определенных отношениях, воздействуют весьма активно как зримо воспринимаемая закономерность, нарушение которой сводит на нет целостность формы. При компоновке панели управления в целом необходимо принимать во внимание: взаимное расположение органов индикации и управления с учетом последовательности работы с ними с тем, чтобы органы зрения и управления человека двигались в одном направлении без резких скачков и зигзагов; при работе с двумя и более ручками регулировки руки оператора не должны перекрещиваться; при работе двумя руками следует стремиться к тому, чтобы движения оператора были симметричны и синхронны; при наличии нескольких разнесенных пультов их состав и расположение должны быть хорошо продуманы.

При внешнем оформлении профессионального РЭС необходимо обращать внимание на эргономичность и эстетичность вспомогательных элементов - соединителей, ручек для переноски, элементов крепления, опорных ножек, направляющих и т.д.

### **Тема 6.3**

## **ОСНОВНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ И СОДЕРЖАНИЕ СТАДИЙ РАЗРАБОТКИ РЭС**

### **6.3.1. Уровни проектирования РЭС**

Возрастание требований к качеству современных РЭС вызывает необходимость непрерывного совершенствования их конструкций и технологии изготовления. Причем конструкторско-технологические задачи долж-

ны решаться в их тесной взаимосвязи, обеспечивая достижение максимальной технико-экономической эффективности.

Проектирование РЭС – многоэтапный процесс создания совокупности документов (расчетов, чертежей и др.), необходимых для изготовления новой высококачественной продукции.

Процесс проектирования РЭС может быть разбит на несколько основных уровней: функциональный, конструкторский и технологический.

*Функциональное проектирование* включает определение основных принципов функционирования, разработку важнейших показателей и характеристик РЭС, а также синтез структуры, функциональных и принципиальных схем РЭС.

*Конструкторское проектирование* заключается в выборе структуры пространственных и энергетических взаимосвязей элементов РЭС, в т.ч. связей с окружающей средой, пользуясь которыми можно изготовить изделие, отвечающее заданным требованиям.

*Технологическое проектирование* состоит в решении задач технологической подготовки производства, разработки технологических процессов изготовления и сборки модулей РЭС, включая выбор технологического оборудования, оснастки, инструмента и пр.

Выполнение проектных работ связано с оформлением конструкторской и технологической документации, отвечающей требованиям Единой системы конструкторской документации (ЕСКД) и Единой системы технологической документации (ЕСТД).

Разработка проектной документации разбивается на определенные стадии, от начала разработки до производства изделий. При этом стадии разработки конструкторской документации (КД) тесно увязаны со стадиями разработки технологической документации (ТД).

Информация о стадиях разработки условно обозначается в виде заглавной буквы – литеры, проставляемой в основной надписи конструкторских и технологических документов.

### **6.3.2. Стадии разработки конструкторской документации**

#### **Стадии ОКР (опытно-конструкторских разработок):**

- техническое задание;
- техническое предложение;
- эскизный проект;
- технический проект;
- разработка рабочей документации.

В процессе выполнения ОКР проводятся все конструкторские и технологические расчеты, необходимые экспериментальные исследования. ОКР заканчивается разработкой полного комплекта конструкторской и технологической документации на изделие и предъявлением заказчику опытного образца или опытной партии изделия, выполненного по этой документации.

**Техническое задание** – это основной документ на проведение ОКР. Оно составляется исполнителем на основании требований, предъявляемых к изделию заказчиком, и устанавливает основное назначение и показатели качества изделия, специальные требования к изделию, объемы, сроки и стадии разработки, комплектности и составу технической документации, порядку испытания и ввода изделия в промышленную эксплуатацию, объемам финансирования и др.

Отдельные стадии разработки могут не планироваться, если изделие не сложное, или проводится модернизация изделия, не связанная с принципиальными изменениями. Если изделие сложное, то составляются частные ТЗ на отдельные составные части (устройства, блоки, узлы). Частные ТЗ содержат более подробные технические требования и содержат дополнительные данные.

**Техническое предложение** – совокупность конструкторских документов, которые содержат технические и технико-экономические обоснования целесообразности разработки нового изделия и уточняют требования к изделию.

Документация, разработанная на этом этапе, имеет литеру «П».

Проводятся патентные исследования, выявляются все возможные технические решения, учитывая тенденции и перспективы развития отечественной и зарубежной техники в данной области; проводятся варианты по патентно-правовым требованиям, оформляют заявки на изобретения; проводят оценку по всем показателям качества и выбирают наилучший вариант.

**Эскизный проект** – совокупность конструкторских документов, содержащих принципиальные конструкторские решения, дающие общие представления об устройстве и принципе работы изделия, а также данные, определяющие назначение, основные параметры и габариты изделия.

Выбранный вариант конструкции подвергается детальной проработке для выявления возможности наиболее полного удовлетворения всех предъявленных к нему требований.

На этой стадии разрабатываются технические решения, обеспечивающие показатели надежности, технологичности, стандартизации и унификации конструкций, эргономики, технической эстетики, безопасности и конкурентоспособности;... .

Проводится обоснование и выбор схемной реализации; составление ТЗ на разработку новых компонентов, а также контрольно-измерительной аппаратуры; описание РЭС в целом и по устройствам; макетирование для отработки электрических схем, тепловых режимов, электромагнитной совместимости; предложения по уточнению ТЗ.

Эскизный проект согласовывается, защищается и утверждается.

**Технический проект** – проектная КД, содержащая окончательные технические решения, дающая полное представление об устройстве разрабатываемого изделия и включающая в себя все данные, необходимые и достаточные для разработки рабочей КД.

Проводится детальная проработка схемных и конструкторских решений (на уровне чертежей на все важные узлы, блоки, устройства), отрабатывается система математического обеспечения; разрабатывается технология изготовления составных частей РЭС и средства автоматизации ее проектирования и изготовления; выполняются пространственные компоновочные эскизы и макеты, позволяющие оценить паразитные связи, тепловые режимы, удобство монтажа, ремонта, эксплуатации и защиту от внешних воздействий; изготавливаются узлы и блоки, которые проходят необходимые контрольные испытания, проверяются: технологичность, уровень унификации и стандартизации, комплексной миниатюризации.

**Рабочий проект** – совокупность рабочей конструкторской и технологической документации, предназначенной для изготовления и испытания опытного образца, опытной партии, серийного (массового) производства. Разрабатывается:

- полный комплект КД, необходимой для изготовления, проверки, изучения и эксплуатации РЭС;
- технология изготовления отдельных узлов и РЭС в целом;
- изготавливаются опытные образцы основных узлов и РЭС;
- составляются программы предварительных (заводских) испытаний основных узлов и РЭС.

Изготавливают **опытный образец**, который оценивает специальная комиссия и дает рекомендации по целесообразности передачи новых РЭС в серийное производство. Если необходимо, определяется перечень доработок и дополнительные испытания.

Документация передается (конструкторская и технологическая) на производство для организации серийного или массового выпуска РЭС.

На предприятии-изготовителе выполняют:

- изготовление и испытание опытной (установочной) серии изделий;
- корректировка КД и ТД;

- изготовление головной (контрольной) серии изделия по полностью оснащеному технологическому процессу;
- корректировка КД и ТД;
- производство изделий.

## Тема 6.4

### КОНСТРУКТОРСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

#### 6.4.1. Комплектность конструкторской документации

Рассмотрим основные понятия, определяющие *комплектность КД*. Различают три варианта комплектности КД на изделие (согласно ГОСТ 2.102-68):

- основной КД;
- основной комплект КД;
- полный комплект КД.

*Основной КД* в совокупности с поименованными в нем конструкторскими документами полностью определяет данное изделие и его состав. Для деталей основным КД является чертеж детали, а для сборочной единицы, комплексов и комплектов – спецификация.

*Основной комплект КД* изделия включает документы, относящиеся ко всему изделию в целом. В него не входят КД составных частей изделия.

*Полный комплект КД* изделия включает:

1. основной комплект КД на данное изделие;
2. основные комплекты КД всех составных частей, входящих в состав данного изделия;
3. основные комплекты КД всех составных частей, входящих в части, упомянутые в п. 2 и т.д.

При автоматизированном конструировании изделий основной комплект конструкторских документов, как правило, не изменяется. Однако для обеспечения автоматизированного изготовления и контроля изделий могут создаваться документы как в традиционном виде (на бумаге, кальке), так и в нетрадиционном – на магнитных носителях (перфоленте, магнитной ленте и т. п.).

#### 6.4.2. Виды и типы схем. Схема как конструкторский документ

*Схема* – это графический конструкторский документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части

изделия и связи между ними. Схемы входят в комплект конструкторской документации и содержат вместе с другими документами необходимые данные для проектирования, изготовления, сборки, регулировки, эксплуатации изделий.

Схемы в зависимости от элементов и связей между ними подразделяются на следующие *виды* (обозначаемые буквами):

- Э – электрические;
- Г – гидравлические;
- П – пневматические;
- Х – газовые (кроме пневматических);
- К – кинематические;
- В – вакуумные;
- Л – оптические;
- Р – энергетические;
- С – комбинированные;
- Е – деления.

По основному назначению схем их подразделяют на следующие *типы* (обозначаемые цифрами):

- структурные – 1;
- функциональные – 2;
- принципиальные (полные) – 3;
- соединений (монтажные) – 4;
- подключения – 5;
- общие – 6;
- расположения – 7;
- объединенные – 0.

Наименование схемы определяется ее видом и типом. Например, схема электрическая принципиальная, схема электрическая структурная и т.д.

Код схемы состоит из буквы, определяющей вид схемы, и цифры, обозначающей тип схемы. Например, ЭЗ – схема электрическая принципиальная, Э1 – схема электрическая структурная и т.д.

Схемы выполняются без соблюдения масштаба, действительное пространственное расположение составных частей изделия не учитывается или учитывается приближенно.

Графическое обозначение элементов (устройств, функциональных групп) и соединяющие их линии связи следует располагать на схеме таким образом, чтобы обеспечить наилучшее представление о структуре изделия и взаимосвязи его составных частей.

Допускается условные графические обозначения элементов располагать в таком же порядке, как они расположены в изделии. Для повышения

наглядности схем допускается изображать графические обозначения элементов или функциональных групп *разнесенным* способом (рис. 6.5), т.е. располагать их составные части в разных местах схемы. В этом случае на поле схемы можно указывать полные условные графические обозначения функциональных частей или таблицы, разъясняющие их расположение.

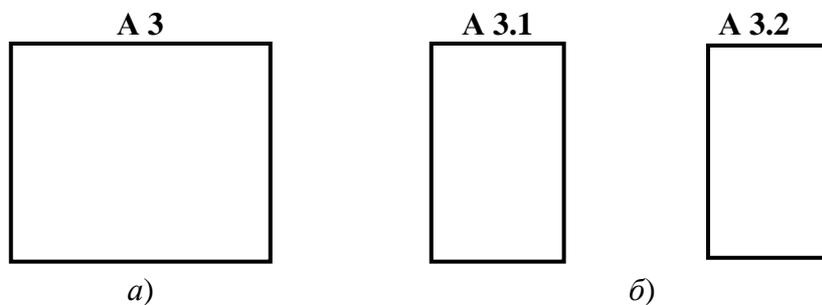


Рис. 6.5. Фрагмент построения схемы электрической принципиальной:  
а – совмещенный способ изображения устройства,  
б – разнесенный способ изображения устройства

Допускается выполнять схемы в пределах условного контура, упрощенно изображающего конструкцию изделия. Условные контуры при этом выполняются сплошными линиями, равными по толщине линиям связи.

Линии связи изображают в виде горизонтальных и вертикальных отрезков, имеющих минимальное количество изломов и взаимных пересечений. Расстояние (просвет) между двумя соседними линиями графического обозначения должно быть не менее 1 мм. Расстояние между соседними параллельными линиями связи должно быть не менее 3 мм, между отдельными условными графическими обозначениями – не менее 2 мм.

Устройства, имеющие самостоятельную принципиальную схему, выполняют на схемах в виде фигуры сплошной линией, равной по толщине линиям связи.

Функциональную группу или устройство, не имеющее самостоятельной принципиальной схемы, выполняют на схемах в виде фигуры штрихпунктирной линией, равной по толщине линиям связи. Фигура, как правило, должна иметь прямоугольную форму. Допускается выделять части схемы фигурами непрямоугольной формы.

Если изделие содержит одинаковые устройства, имеющие самостоятельные принципиальные схемы, то каждое из них рассматривают как элемент схемы и изображают на схеме в виде прямоугольника или условного графического обозначения, присваивают ему позиционное обозначение и записывают в перечень элементов одной позицией.

### 6.4.3. Правила выполнения схемы электрической принципиальной

Схема электрическая принципиальная (ЭЗ) является наиболее полной электрической схемой изделия, на которой изображают все электрические элементы и устройства, необходимые для осуществления и контроля в изделии заданных электрических процессов, все электрические связи между ними и электрические элементы, которыми заканчиваются входные и выходные цепи.

Электрические элементы на схеме изображают в виде условных графических обозначений, установленных стандартами ЕСКД. Элементы, используемые в изделии частично, допускается изображать не полностью, а только используемые части. Схемы выполняют для изделий, находящихся в отключенном положении.

Условные графические обозначения элементов и устройств выполняют совмещенным (составные части элементов или устройств изображают на схеме в непосредственной близости друг к другу) или разнесенным (составные части элементов и устройств или отдельные элементы устройств изображают на схеме в разных местах так, чтобы отдельные цепи изделия были изображены наиболее наглядно) способами

При изображении элементов *разнесенным* способом допускается на свободном поле схемы помещать условные графические обозначения элементов, выполненные совмещенным способом. При этом элементы, используемые в изделии частично, изображают полностью с указанием использованных и неиспользованных частей (например, все контакты реле).

Выводы неиспользованных частей изображают короче, чем выводы использованных.

Схемы выполняют в многолинейном (рис. 6.6, *а*) или однолинейном (рис. 6.6, *б*) изображении.

При *многолинейном* изображении каждую цепь изображают отдельной линией, а элементы, содержащиеся в этих цепях – отдельными условными графическими обозначениями на схеме, присваиваются условные буквенно-цифровые позиционные обозначения в соответствии с ГОСТ 2.710-81.

Позиционные обозначения элементам (устройствам) присваивают в пределах изделия.

Порядковые номера элементам (устройствам) следует присваивать, начиная с единицы, в пределах группы элементов (устройств), которым на схеме присвоено одинаковое буквенное позиционное обозначение (например: R1, R2, R3 и т.д.; С1, С2, С3 и т.д.). Порядковые номера должны быть присвоены в соответствии с последовательностью расположения элементов или устройств на схеме сверху вниз в направлении слева направо. Буквы и

цифры позиционного обозначения выполняют чертежным шрифтом одного размера. Позиционные обозначения проставляют на схеме рядом с установленными графическими обозначениями элементов и (или) устройств с правой стороны или над ними. На схеме изделия, в состав которого входят устройства, позиционные обозначения элементам присваивают в пределах каждого устройства, а при наличии нескольких одинаковых устройств – в пределах этих устройств по правилам, изложенным выше.

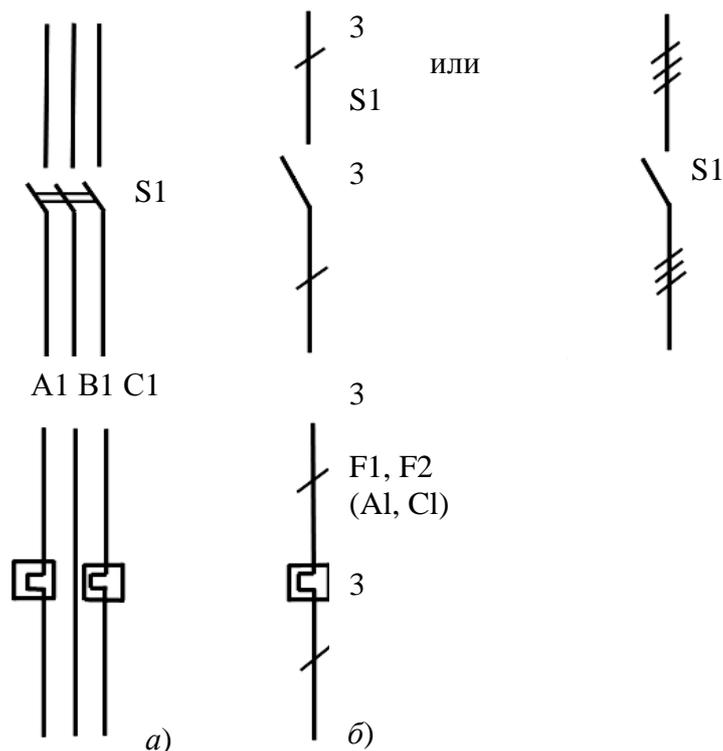


Рис. 6.6. Фрагмент схемы электрической принципиальной:  
*а* – многолинейное изображение, *б* – однолинейное изображение

Если в состав изделия входят функциональные группы, то вначале присваивают позиционные обозначения элементам, не входящим в функциональные группы, а затем элементам, входящим в функциональные группы. Для одинаковых функциональных групп, например,  $\neq A1$ ,  $\neq A2$ , позиционные обозначения элементов, присвоенные в одной из них, повторяют во всех последующих группах.

Обозначение устройства указывают сверху или справа от изображения. При разнесенном способе изображения позиционные обозначения проставляют около каждой составной части. При разнесенном способе изображения элементов, входящих в устройство или функциональную группу, в состав позиционных обозначений этих элементов должно вхо-

дить соответственно позиционное обозначение данного устройства или функциональной группы, например, = АЗ – С5 – конденсатор С5, входящий в устройство АЗ, или  $\neq$  АТ1 – С5 – конденсатор, входящий в функциональную группу  $\neq$  АТ1.

Допускается в отдельных случаях все сведения об элементах помещать около условных графических обозначений.

При условном присвоении обозначений выводам (контактам) на поле схемы помещают соответствующее пояснение.

При изображении элемента разнесенным способом поясняющую надпись помещают около одной составной части изделия или на поле схемы около изображения элемента, выполненного совмещенным способом.

На схеме изделия разрешается изображать отдельные элементы, не входящие в данное изделие, но необходимые для разъяснения принципа его работы. Графические обозначения этих элементов отделяют от основной схемы тонкой штрих-пунктирной линией с двумя точками.

На схеме рекомендуется указывать характеристики входных и выходных цепей изделия (частоту, напряжение, силу тока, сопротивление, индуктивность и т.п.), параметры, подлежащие измерению на контрольных контактах, гнездах и т. п.

Если невозможно указать характеристики или параметры входных и выходных цепей изделия, то рекомендуется указывать наименование цепей или контролируемых величин.

Если изделие заведомо предназначено для работы только в определенной установке, то на схеме допускается указывать адрес внешних соединений входных и выходных цепей данного изделия. Адрес должен обеспечивать однозначность присоединения. Например, если входной контакт изделия должен быть соединен с пятым контактом третьего соединителя устройства А, то адрес должен быть записан следующим образом: = А – ХЗ : 5. Допускается указывать адрес в общем виде, если будет обеспечена однозначность присоединения, например, «Прибор А».

Характеристики входных и выходных цепей изделия, адреса их внешних подключений рекомендуется записывать в таблицы, помещаемые взамен условных графических обозначений входных и выходных элементов-соединителей, плат и т.д. (рис. 6.7).

Каждой таблице присваивают позиционное обозначение элемента, взамен которого она помещена. Над таблицей допускается указывать условное графическое обозначение контакта – гнезда или штыря. Таблицы допускается выполнять разнесенным способом. Порядок расположения контактов в таблице определяется удобством построения схемы. Допуска-

ется помещать таблицы с характеристиками цепей при наличии на схеме условных графических обозначений входных и выходных элементов – соединителей, плат и т.д.

Такие же таблицы помещают на линиях, изображающих входные и выходные цепи и не заканчивающихся на схеме соединителями, платами и т.д. В этом случае позиционные обозначения таблицам не присваиваются.

X1

Конт.	Цепь	Адрес
1	$f = 0,3 \dots 3 \text{кГц}; R_{\text{ц}} = 600 \text{ Ом}$	= A1-X1:1
2	$U_{\text{вых}} = 0,5 \text{ В}; R_{\text{ц}} = 600 \text{ Ом}$	= A1-X1:2
3	$U_{\text{вых}} = +60 \text{ В}; R_{\text{ц}} = 600 \text{ Ом}$	= A1-X1:3
4	$U_{\text{вых}} = +20 \text{ В}; R_{\text{ц}} = 600 \text{ Ом}$	= A1-X1:4

X1

Конт.	Цепь	Адрес
1	$f = 0,3 \dots 3 \text{кГц}; R_{\text{ц}} = 600 \text{ Ом}$	= A1-X1:1
2	$U_{\text{вых}} = 0,5 \text{ В}; R_{\text{ц}} = 600 \text{ Ом}$	= A1-X1:2
3	$U_{\text{вых}} = +60 \text{ В}; R_{\text{ц}} = 600 \text{ Ом}$	= A1-X1:3
4	$U_{\text{вых}} = +20 \text{ В}; R_{\text{ц}} = 600 \text{ Ом}$	= A1-X1:4

Рис. 6.7. Таблица адресов

Допускается проставлять в графе «Конт.» несколько последовательных номеров контактов, в случае если они соединены между собой. Номера контактов отделяют друг от друга запятой.

При изображении на схеме многоконтактных соединений допускается применять условные графические обозначения, не показывающие отдельные контакты (ГОСТ 2.755-74).

Если таблицы помещены на поле схемы или на последующих листах, то им присваивают позиционные обозначения соединителей, к которым они составлены.

В графах таблиц указывают следующие данные:

- в графе «конт.» – номер контакта, соединителя. Номера контактов записывают в порядке возрастания;
- в графе «адрес» – обозначение цепи и (или) позиционное обозначение элементов, соединяемых с контактами;
- в графе «цепь» – характеристику цепи;
- в графе «адрес внешний» – адрес внешнего соединения.

Если в изделие входит несколько одинаковых устройств, то схему устройства помещают не в прямоугольник, а на свободном поле, с надписью по типу «Схема блока А1 – А4».

На поле схемы допускается помещать указания о марках, сечениях и расцветках соединительных проводов и кабелей, специальные указания к электрическому монтажу изделия.

При выполнении принципиальной схемы на нескольких листах должны соблюдаться следующие требования:

- нумерация позиционных обозначений элементов должна быть сквозной в пределах изделия (устройства);
- перечень элементов должен быть общим;
- при повторном изображении отдельных элементов на других листах схемы следует сохранять позиционные обозначения, присвоенные им на одном из листов схемы.

#### **6.4.4. Система обозначений конструкторской документации**

Единая обезличенная классификационная система обозначения изделий и их конструкторских документов устанавливается ГОСТ 2.201-80.

Обозначения изделиям и конструкторским документам должны быть присвоены централизованно или децентрализованно. *Централизованное* присвоение обозначений должны осуществлять организации, которым это поручено министерством, ведомством, в пределах объединения, отрасли.

*Децентрализованное* присвоение обозначений должны осуществлять организации-разработчики.

Конструкторские документы сохраняют присвоенное им обозначение независимо от того, в каких изделиях они применяются, причем эти обозначения записывают без сокращений и изменений, за исключением случаев, предусмотренных ГОСТ 2.113-75. Если конструкторский документ выполнен на нескольких листах, его обозначение должно быть указано на каждом листе.

Деталям, на которые не выпущены чертежи согласно ГОСТ 2109-73, присваиваются самостоятельные обозначения по общим правилам.

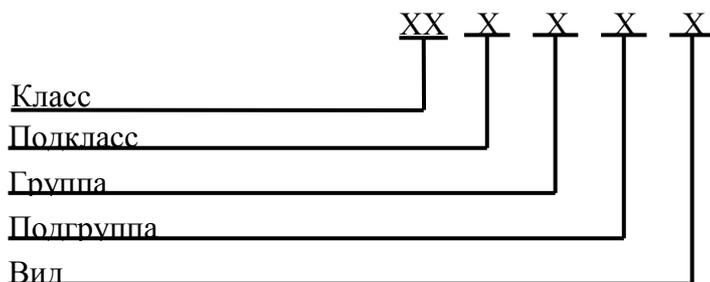
Согласно ГОСТ 2.201-80 структура обозначения изделия и основного конструкторского документа должна быть следующей:

Четырехзначный буквенный код организации-разработчика назначается по кодификатору организаций-разработчиков.

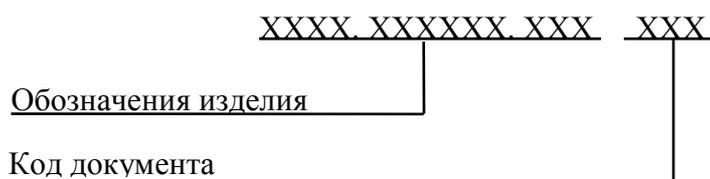
Код классификационной характеристики присваивают изделию и конструкторскому документу в соответствии с *классификатором ЕСКД*.

**Структура кода.** Порядковый регистрационный номер присваивают по классификационной характеристике от 001 до 999 в пределах кода организации-разработчика или организации, осуществляющей централизованное присвоение.

Структура обозначения неосновного КД следующая:



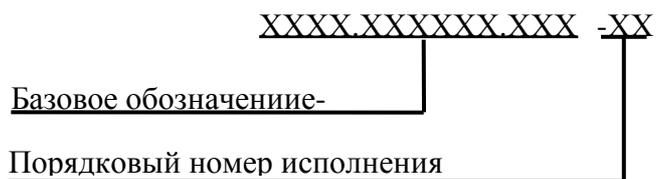
Код организации-разработчика



В коде документа должно быть не более четырех знаков, включая номер части документа, например:

ПГУ.462345.015СБ.

Каждому исполнению изделия присваивают самостоятельное обозначение:



Пример: ПГУ.752543.073-01.

## ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

1. Основные определения: проектирование, конструирование, конструкция, конструкторская документация.
2. Основные цели и задачи современного конструирования.
3. Этапы развития конструкций РЭС.
4. Климатическое исполнение РЭС. Варианты исполнения.
5. Типы атмосферы и климатическое исполнение РЭС.
6. Категории размещения изделий РЭС.
7. Факторы, воздействующие на РЭС: систематические, случайные, субъективные и объективные.
8. Климатические факторы внешней среды, воздействующие на РЭС.
9. Биологические, механические и радиационные факторы внешней среды, воздействующие на РЭС.
10. Технические требования, предъявляемые к РЭС.
11. Качество изделия. Показатели качества конструкции РЭС.
12. Принцип модульного конструирования аппаратуры. Основные направления.
13. Особенности модульного конструирования. Агрегатирование.
14. Базовые несущие конструкции РЭС.
15. Классификация РЭС по категориям, классам, группам.
16. Особенности проектирования наземных РЭС.
17. Особенности проектирования морских РЭС.
18. Особенности проектирования бортовых РЭС.
19. Металлические конструкционные материалы, применяемые при изготовлении РЭС.
20. Полупроводниковые материалы, используемые при изготовлении РЭС.
21. Диэлектрические материалы, используемые при изготовлении РЭС.
22. Магнитным материалам, применяемым для изготовления РЭС.
23. Единая система допусков и посадок. Основные термины и определения.
24. Посадки в системе отверстия. Посадки в системе вала.
25. Методы выбора допусков и посадок на детали и сборочные единицы.
26. Способы указания на чертежах предельных отклонений размеров.
27. Допуски на форму и взаимное расположение поверхностей.
28. Шероховатость поверхности. Параметры шероховатости.
29. Зависимость параметров шероховатости поверхности от ее эксплуатационных свойств.
30. Условное обозначение шероховатости поверхности на чертежах.
31. Технологические методы получения тонкообработанных поверхностей.
32. Печатная плата. Преимущества и недостатки печатного монтажа.
33. Конструктивно-технологические разновидности печатных плат.
34. Классы точности для выполнения размеров элементов конструкций ПП.
35. Классификация многослойных печатных плат.
36. Материалы для изготовления печатных плат.
37. Методы изготовления коммутационных плат.
38. Методы формирования рисунка схемы.
39. Типовые техпроцессы изготовления односторонних, двуслойных, многослойных ПП.
40. Типовые операции техпроцесса изготовления печатных плат.
41. Методы коммутации.

42. Конструктивные покрытия печатных плат.
43. Особенности поверхностного монтажа.
44. Контроль качества и диагностика плат.
45. Схема процесса изготовления толсто пленочных интегральных микросхем.
46. Исходные материалы для получения проводниковых, резистивных и диэлектрических паст.
47. Подложки толсто пленочных интегральных микросхем.
48. Особенности получения рабочих рисунков из паст: нанесение, сушка, вжигание.
49. Способы получения в полупроводнике областей с заданной концентрацией примесей.
50. Методы электрической изоляции элементов полупроводниковых ИС.
51. Физико-химические процессы формирования тонко пленочных ИС.
52. Особенности техпроцесса создания тонко пленочных элементов.
53. Способы получения тонких пленок.
54. Подложки для изготовления гибридных интегральных микросхем (требования, материалы).
55. Применения металлических пленок в гибридных интегральных схемах.
56. Основные свойства изоляционных пленок.
57. Конструирование пленочных резисторов, в том числе подгоняемых.
58. Выбор технологии и материалов тонко пленочных резисторов
59. Выбор технологии и материалов толсто пленочных резисторов.
60. Расчет основных геометрических размеров пленочного резистора.
61. Определение паразитных параметров пленочного резистора.
62. Конструкции пленочных конденсаторов, в том числе подгоняемых.
63. Материалы для изготовления пленочных конденсаторов.
64. Выбор типа конструкции и расчет основных размеров элементов конденсаторов.
65. Оценка паразитных параметров конденсаторов.
66. Анализ механических сил, действующих на РЭС.
67. Реакция РЭС и их элементов на механические воздействия.
68. Способы виброзащиты конструкций РЭС.
69. Оценка виброзащищенности радиоаппаратуры.
70. Тепловой баланс и тепловой режим изделий.
71. Теплообмен в конструкциях РЭС за счет кондукции и излучения.
72. Процесс передачи теплоты за счет теплопроводности.
73. Классификация систем охлаждения.
74. Выбор способа обеспечения нормального теплового режима на ранних стадиях разработки.
75. Естественное воздушное охлаждение.
76. Принудительное воздушное охлаждение.
77. Жидкостное охлаждение. Комбинированные способы охлаждения.
78. Системы испарительного охлаждения.
79. Причины появления влаги во внутренней среде гермокорпуса РЭС. Воздействие влаги на материалы и компоненты.
80. Способы влагозащиты РЭС.
81. Защита конструкций РЭС от агрессивной внешней среды с помощью покрытий. Классификация покрытий.

82. Защита конструкций РЭС с помощью негальванических и химических покрытий.
83. Защита конструкций РЭС с помощью гальванических покрытий.
84. Защита конструкций герметизацией.
85. Контакты электрических соединителей.
86. Виды электрических соединений в конструкциях РЭС.
87. Разъемные соединители.
88. Учет психофизиологических факторов при разработке РЭС.
89. Обеспечение эстетических качеств РЭС.
90. Особенности внешнего оформления профессиональных и бытовых РЭС.
91. Уровни проектирования РЭС.
92. Стадии разработки конструкторской документации.
93. Комплектность конструкторской документации.
94. Виды и типы схем. Схема как конструкторский документ.
95. Правила выполнения схемы электрической принципиальной.
96. Система обозначений конструкторской документации.

*Учебное издание*

**КОНСТРУИРОВАНИЕ  
И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА  
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС  
для студентов специальности 1-39 01 01  
«Радиотехника»

Составитель  
МОЛОДЕЧКИНА Татьяна Викторовна

*Редактор Т. А. Дарьянова*

*Дизайн обложки И. С. Васильевой*

---

Подписано в печать 18.02.08. Формат 60x84 1/16. Гарнитура Таймс. Бумага офсетная.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 9,75. Уч.-изд. л. 9,54. Тираж 45. Заказ № 249.

---

Издатель и полиграфическое исполнение –  
Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

ЛИ № 02330/0133020 от 30. 04. 04

ЛП № 02330/0133128 от 27.05.04

211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29