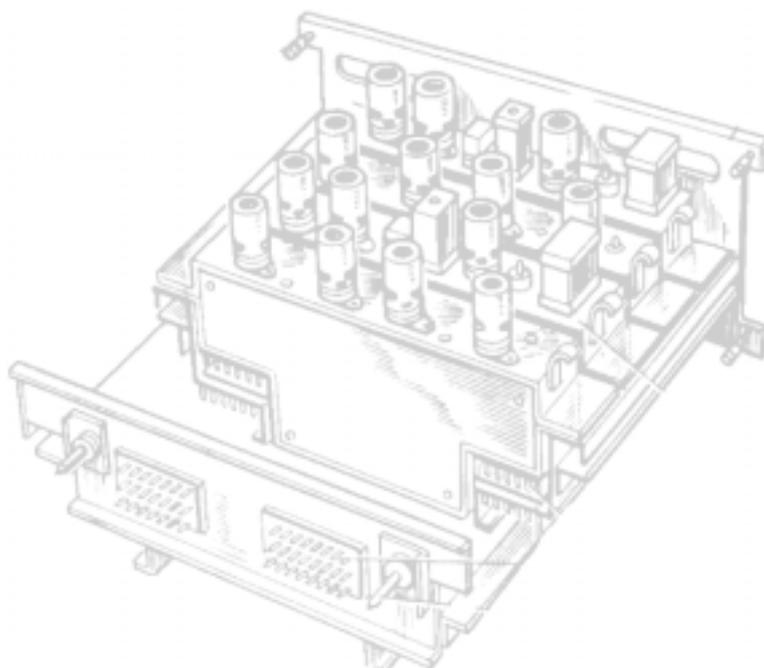


• •

# Конструирование и технология РЭС



2001

---

УДК 621.396

**Лопаткин А.В.**

**Конструирование и технология РЭС:** Учебное пособие для радиотехнических спец. вузов.  
– Н. Новгород, НГТУ, 2001. - 3 с.: ил.

## **ЛЕКЦИЯ 1. СОДЕРЖАНИЕ, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСА**

*Введение: Место курса в системе общей подготовки, его цель.  
Содержание курса: Состав курса. Тематика лекций. Литература. Требования к выполнению лабораторных работ. Особенности курсового проектирования. Экзамен.  
Организация процесса проектирования РЭС: Заказчики и исполнители. Распределение внутри предприятия. Этапы проектирования. НИР. ОКР. Рабочая документация.*

### **1.1. Введение**

**В** процессе разработки и изготовления РЭС принимают участие специалисты различных профилей: схемотехники, конструктора, технологи, механики, теплотехники, специалисты по обеспечению надежности, испытатели и т.д. Студентам-радиотехникам важно понимать, что с созданием схемы принципиальной электрической разработка изделия не кончается. Эту схему необходимо представить в виде конструкции, а затем, в процессе производства, получить готовое изделие. Нужно отдавать себе отчет в том, что потребителю нужна не схема, не конструкторская или технологическая документация, а реальное устройство, способное удовлетворить его конкретные потребности.

Успех разработки любого изделия РЭС будет зависеть от того, насколько квалифицированно и согласованно будут работать все звенья триады: схемотехник – конструктор – технолог. Если где-то в этой цепочке произойдет сбой, качественного и конкурентоспособного изделия не получить никогда! Согласованные действия специалистов, принимающих участие в разработке и производстве изделий возможны только в том случае, если каждый из них понимает, как его решения скажутся на последующих этапах. Особенно это относится к инженерам схемотехники и конструкторам, задействованным в самом начале процесса проектирования РЭС. Их неудачные или непродуманные решения, незнание ими специфики труда конструктора или технолога приводят к значительным временным и материальным затратам на всевозможные переделки уже готовых конструкций или технологических процессов.

*Основной целью курса "Основы конструирования и технологии РЭС" является знакомство студентов-радиотехников со спецификой работы конструкторов и технологов, основными задачами, которые этим специалистам приходится решать, а также с особенностями процессов конструирования и производства современных РЭС.*

### **1.2. Содержание курса**

Курс одно-семестровый и включает 36 часов лекций, курсовой проект и 18 часов лабораторных работ. Заканчивается изучение курса экзаменом.

#### **1.2.1. Лекции**

По тематическому содержанию лекции можно разделить на четыре больших раздела:

- основные вопросы конструирования РЭС (этапы конструирования, конструкторская документация, обеспечение тепловых режимов и защита от механических воздействий, электромагнитная совместимость и др. );
- особенности конструирования изделий с печатным монтажом и система автоматизированного проектирования печатных плат P-CAD;
- основы выборочного контроля качества и испытаний РЭС на надежность; -
- базовые технологические процессы и технологическая подготовка производства.

Из-за малого количества аудиторных часов лекции по некоторым разделам носят обзорный характер. Значительная часть материала, имеющая описательный характер предлагается для самостоятельной проработки.

### 1.2.2. Основная литература по курсу

1. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств: Учеб. для вузов.- М.: Высш. шк., 1990.-432 с.
2. Савельев А.Я., Овчинников В.А. Конструирование ЭВМ и систем: Учеб. для вузов.-М.: Высш. шк., 1989.-312 с.
3. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. для вузов/ Под ред. А.П. Достанко, Ш.М. Чабдарова.-М.: Радио и связь, 1989.-624 с.
4. Ушаков Н.Н. Технология производства ЭВМ: Учеб. для вузов. -М.: Высш. шк., 1991.-416 с.

Дополнительная литература по отдельным разделам курса указывается после рассмотрения соответствующих тем.

### 1.2.3. Лабораторные работы

В течение семестра выполняются следующие лабораторные работы:

Тема 1. Система автоматизированного проектирования P-CAD.

(8 часов аудиторных занятий).

Литература: «Изучаем P-CAD»./ Методические указания к лабораторной работе №5 по дисциплине "Основы конструирования и технологии РЭС" для спец. «Радиотехника».

Тема 2. Изучение влияния механических воздействий на РЭС и способов защиты от них.

(4 часа аудиторных занятий).

Литература: "Расчет и исследование систем виброизоляции РЭС"/Методические указания к лабораторной работе по дисциплине "Основы конструирования и технологии РЭС" для специальности 23.01.

Тема 3:Изучение влияния тепловых режимов РЭС на параметры конструкции, способов их расчета и обеспечения.

(4 часа аудиторных занятий).

Литература: "Обеспечение тепловых режимов РЭС"/ Методические указания к лабораторной работе №4 по дисциплине "Основы конструирования и технологии РЭС" для специальности 23.01.

Лабораторные работы по темам 1-2, проводятся в компьютерном классе фронтально бригадами по 2-3 человека, но отчет по работе готовится индивидуально каждым студентом. Остальные работы носят чисто расчетный характер, не требуют для своего проведения специального оборудования и выполняются каждым студентом индивидуально во внеаудиторное время (например, в читальном зале библиотеки). Во время аудиторных занятий проводится консультация по соответствующим темам, сдача коллоквиумов и прорабатываются отдельные разделы курсового проекта. Желательна привязка вариантов заданий лабораторных работ к тематике курсового проекта. Форма отчета оговаривается в соответствующих методических указаниях или преподавателем, ведущим занятия.

Для выполнения работы по теме студенты уже к первому занятию должны выбрать схему, содержащую 5-10 радиоэлектронных компонентов, в том числе 2-4 микросхемы средней степени интеграции (ТТЛ или КМОП серии К155, К555, К176, К561 и т.д.).

Следует обратить особое внимание на регулярное посещение лабораторных занятий и качественную подготовку к коллоквиумам, т.к. количество дополнительных занятий будет

сведено к минимуму (одно двухчасовое занятие во время зачетной недели на группу). С началом экзаменационной сессии лабораторные занятия прекращаются!!

#### 1.2.4. Курсовой проект

Темой курсового проекта является разработка конструкции функционально законченного радиоэлектронного устройства соответствующего второму уровню конструкторской иерархии (отдельный прибор или блок). Разрабатываемое устройство должно иметь самостоятельное функциональное назначение и включать в свой состав 2-3 конструкции 1-го уровня (ячейка, ТЭЗ). В процессе выполнения проекта необходимо провести общую компоновку изделия, компоновку одной из ячеек (печатных узлов), трассировку проводников на печатной плате. На защиту проекта предоставляется пояснительная записка объемом 15-20 листов формата А4 с необходимыми расчетами и обоснованиями, сборочный чертеж всего изделия со спецификацией, схема электрическая принципиальная отдельной ячейки (печатного узла) с перечнем элементов, сборочный чертеж этого печатного узла со спецификацией и чертеж печатной платы ячейки.

Тематика курсового проекта, содержание пояснительной записки и требования к оформлению чертежей подробно рассмотрены в следующих методических указаниях:

*"Конструируем радиоаппаратуру": Методические указания к курсовому проекту по дисциплине "Основы конструирования и технологии РЭС" для специальности 23.01. – Н.Новгород, НГТУ, 1998 г.*

*"Конструирование печатных узлов": Методические указания к лабораторной работе по дисциплине "Основы конструирования и технологии РЭС" для студентов специальности 23.01. -Нижний Новгород, НГТУ, 1993 г.*

Выполнение проекта должно проводиться в соответствии с графиком, утвержденным руководителем проекта.

#### 1.2.5. Экзамен

Изучение курса заканчивается экзаменом. В экзаменационных билетах два вопроса по основным разделам курса (см. Приложение). Материала лекций для получения положительной оценки на экзамене вполне достаточно. Пользоваться какой-либо литературой при подготовке и ответе на экзамене не разрешается. Студенты, не сдавшие лабораторные работы и курсовой проект, к экзамену не допускаются!

### 1.3. Организация процесса проектирования РЭС

Как правило, в создании РЭС участвуют различные организации, подразделения, исполнители. Организации делятся на заказчика, исполнителя, субподрядчика.

Заказчик формирует технические требования (ТТ) к РЭС и осуществляет финансирование и приемку разработанного изделия. Технические требования определяют показатели назначения (мощность, чувствительность, разрешающую способность, частотный диапазон и т.д.), а также содержат требования к конструкции: наименование, число и назначение основных частей; габаритные, установочные и присоединительные размеры; требования по взаимозаменяемости частей, унификации, типизации, стандартизации и преемственности. Кроме того, в ТТ входят требования по охране окружающей среды, помехозащищенности, составу запасного имущества, безопасности работы, эргономике и эстетике, условиям эксплуатации (виду объекта установки, уровням климатических, механических, радиационных и биологических воздействий, порядку обслуживания, квалификации обслуживающего персонала).

Исполнитель на основе ТТ разрабатывает техническое задание (ТЗ), в котором содержатся экономические, производственные и другие требования, определяется порядок

разработки и приемки изделия. Субподрядчик решает для исполнителя частные вопросы: разработку и поставку новых материалов, элементов, узлов, технологических процессов, методов измерений или проводит испытания, отработку на соответствие требованиям эргономики и т.д.

В проектировании РЭС в той или иной степени на разных стадиях участвуют различные подразделения предприятия:

- системотехнические определяют структуру РЭС, осуществляют разбивку на наземную и бортовую части и др.
- схемотехнические разрабатывают и отлаживают схему, проводят ее разбивку на отдельные узлы;
- конструкторские осуществляют общую компоновку изделия, выпускают необходимую конструкторскую документацию;
- технологические устанавливают последовательность изготовления, проводят отработку режимов, подготовку производства.

Кроме этого, в разработке изделия принимают участие различные вспомогательные службы: надежности (рекомендации по структурной и информационной избыточности, проведение испытаний); снабженческие (поставка материалов и покупных изделий); патентные, автоматизированного конструкторского проектирования и др. Координация работы предприятий, подразделений и специалистов, участвующих в разработке проводится с помощью согласованных календарных планов или сетевых графиков

Для уменьшения вероятности неправильных решений из-за противоречивости и неполноты исходных данных, личностных ошибок исполнителей разработку РЭС проводят в несколько стадий (не менее двух): научно-исследовательская (НИР) и опытно-конструкторская (ОКР) работы. Каждая стадия включает несколько этапов. В ходе выполнения работ на стадиях и этапах происходит постепенное уточнение и обсуждение принимаемых решений. При этом устраняются ошибки руководителей (ошибки планирования и др.) и исполнителей (неправильный выбор технических решений, ошибки в разработанной документации и т.д.). Основные стадии жизненного цикла РЭС представлены в таблице 1.

Этап	Вид работ	Содержание работ
1	НИР	Составление заявки на разработку
2		Разработка ТЗ и ЧТЗ
3	ОКР	Разработка технического предложения
4		Разработка эскизного проекта
5		Разработка технического проекта
6	Разработка КД опытного образца	Разработка КД опытного образца. Изготовление и испытание образца. Корректировка КД (литера "О")
7		Доработка образца, приемочные испытания, корректировка КД (литера О <sub>1</sub> )
8	Разработка КД установочной серии	Подготовка производства и постановка на производство, изготовление установочной серии, корректировка КД
9		Ведение и конструкторское сопровождение серийного производства
10	Эксплуатация	Обеспечение нормальной эксплуатации

Спецификой разработки РЭС является очень тесное взаимодействие специалистов различных служб на всех стадиях с самого начала проектирования.

Основными этапами НИР являются следующие:

- Предплановый патентный поиск;

- Разработка и согласование с заказчиком технического задания, государственная регистрация НИР;
- Подготовительный этап - выбор направлений исследования, разработка, согласование и утверждение частных технических заданий на основные части НИР;

Таблица 1-1.

- Основной этап - теоретические и экспериментальные исследования (выполнение теоретических изысканий, расчетов, математическое моделирование), обработка их результатов, составление и оформление технической документации;
- Заключительный этап - обобщение результатов и оценка выполненной НИР;
- Приемка НИР, обсуждение и согласование задания на проведение ОКР, государственный учет НИР.

Последовательность выполнения и содержание этапов ОКР строго регламентируется государственными стандартами. Так ЕСКД предусматривает выполнение следующих этапов.

**Техническое задание** (ТЗ) составляется исполнителем на основе технических требований заказчика. На основе общего ТЗ могут быть составлены частные ТЗ для субподрядчиков. Объем экономических и производственных требований в них меньше, а технические требования, наоборот, расписаны более подробно.

**Техническое предложение** - этап разработки, на котором исполнителем обосновывается принципиальная возможность создания РЭС с заданными в ТЗ характеристиками и намечаются основные технические и организационные решения по выполнению ТЗ, составляются частные ТЗ для различных подразделений предприятия. По результатам работы составляется технический отчет.

**Эскизный проект** - совокупность конструкторских документов, содержащих проработанные конструкторско-технологические решения, дающие общее представление об изделии, а также данные, определяющие возможность использования по назначению и основные параметры разрабатываемого изделия.

**Технический проект** - совокупность конструкторских документов, содержащих окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия, и технические данные для разработки рабочей документации. На этом этапе проводятся различные конструкторские расчеты и обоснования.

**Рабочая документация** - это совокупность конструкторской документации, предназначенной для изготовления и испытания опытного образца, установочной серии, серийного образца. После заводских испытаний опытного образца конструкторской документации присваивается литера "О"; после государственных, межведомственных, приемочных и других видов испытаний - литера "О1"; на последующих стадиях (после повторных испытаний изготовленных изделий) - литеры "О2", "О3" и т.д. Конструкторская документация на изделие для установочной серии имеет литеру "У"; после испытаний установочной серии литеру "А". После корректировки документации испытательной (головной) серии конструкторской документации присваивается литера "Б", что дает право наладить серийное или массовое производство изделия. Документации на изделие для разового изготовления присваивают литеру "И". В зависимости от сложности изделия, сроков разработки, квалификации исполнителей, наличия прототипов и базовых несущих конструкций по согласованию с заказчиком отдельные этапы могут быть объединены.

#### 1.4. Литература по теме

1. Гелль П.П., Иванов-Есипович Н.К. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов Л.: Энергоатомиздат, 1984.-536 с.

### **1.5. Вопросы для самопроверки**

1. *Кто формирует технические требования к разрабатываемой аппаратуре?*
2. *Какие структурные подразделения предприятия участвуют в разработке РЭС?*
3. *Назовите основные стадии проектирования РЭС.*
4. *Назовите и охарактеризуйте основные этапы НИР и ОКР.*
5. *Как и в какой последовательности разрабатывается рабочая документация?*

## **ЛЕКЦИЯ 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

*История конструкций РЭС: Когерер. Радиолампы. Телефония. Увеличение производства и специализация. Расширение сферы применения. Цифровая техника. Аппаратура I-го поколения в тупике. Транзистор. ЦОС. От унифицированных узлов к микросхемам. Запросы растут. ГИС, БИСы и СБИСы. Крупноформатные печатные узлы.*

*Понятие конструирования и конструкции РЭС: Понятие конструирования. Определение и отличительные черты конструкции РЭС.*

*Структура конструкций РЭС: Понятие радиоэлектронного модуля. Модули I-го уровня. Несущие конструкции РЭС. Модули 2-го и 3-го уровней.*

*Главные задачи конструирования РЭС: Комплексная миниатюризация. Элементная база. Обеспечение тепловых режимов. Технологичность.*

### **2.1. История конструкций рэс**

Интересно, что конструирование РЭА началось раньше изобретения радиосвязи, поскольку и Александр Степанович Попов и Гульельмо Маркони первоначально работали над созданием рациональной конструкции когерера (детектора). Общая конструкция беспроводного телеграфа первые два десятилетия не отличалась от телеграфной аппаратуры тех лет. Основой конструкции служил деревянный ящик, внутри которого на стенках размещались необходимые составные части. Соединения осуществлялись с помощью проволоки, клемм и винтов.

С изобретением электронной лампы возникла потребность в экранировании, поскольку повышение коэффициента усиления зачастую приводило к самовозбуждению каскадов из-за паразитных связей. Поэтому в конце 20-х годов вместо деревянного появилось металлическое основание (шасси), что существенно улучшило экранирование.

В начале 30-х годов электронные усилители стали применяться в телефонии, где уже существовали проверенные многолетней практикой традиции конструирования аппаратуры в виде стойки - вертикальной рамы с расположенными друг над другом блоками. Такая конструкция была первым носителем прогрессивной идеи расчленения сложной аппаратуры на простые составные части (узлы). Сформировалась иерархическая структура конструкции, которая успешно используется до сих пор.

Расширение области применения и масштабов производства привело к созданию специализированных предприятий по разработке и изготовлению радиоаппаратуры. Вместо винтовых стали использоваться паяные соединения, что резко уменьшило трудоемкость сборки.

С начала 40-х годов радиотехническая аппаратура из помещения вышла в полевые условия. Ее устанавливают в самолеты, танки, автомашины. На плечи конструкторов и технологов легла нелегкая задача обеспечения работоспособности и высокой надежности в условиях повышенной влажности, воздействия вибраций и ударов, резких колебаний внешней температуры.

Пятидесятые годы характеризуются значительным усложнением конструкции аппаратуры, особенно импульсной и аппаратуры дальней навигации. Резко возросла трудоемкость сборочных работ. Необходимость ее снижения заставила обратиться к давно заявленной, но мало используемой до тех пор идее печатных схем. Печатная схема представляет собой пластину с печатным рисунком, электрофизические свойства которого выполняют функции монтажных соединений и пассивных элементов схемы. От этой общей идеи в то время был использован только принцип печатного монтажа на основе печатных соединительных плат (кросс-плат).

Главными трудностями в аппаратуре на электронных лампах, которую принято называть аппаратурой I поколения, были большое тепловыделение, значительный объем и масса ламповых каскадов, низкая их надежность. В этих условиях разработанные к тому времени прогрессивные идеи цифровой обработки сигналов, требовавшие многократного

повторения ключевых устройств, рисковали остаться не реализованными в широкой практике. Даже унифицированные конструкции с миниатюрными лампами типа "дробь", разработанные на основе печатных плат и являвшиеся наиболее удачным вариантом конструкции I поколения, не спасали положения.

Изобретение в 1948 году У. Шокли, У. Браттейном и Дж. Бардином транзистора вывело конструирование сложной РЭА из тупика. С освоением массового выпуска транзисторов начался период аппаратуры II поколения

В начале 60-х годов широкое использование цифровых методов обработки сигналов позволили сформировать унифицированные функциональные узлы общего применения, не привязанные к конкретному устройству. Это дало толчок к развитию полупроводниковой микроэлектроники, производству интегральных микросхем (ИС). Термин "интегральные" здесь использован для обозначения факта объединения в одном полупроводниковом кристалле свойств многих элементов, входящих в состав функционального узла, включая транзисторы и обслуживающие их пассивные элементы. Причем такая совокупность образуется не в результате сборки отдельно изготовленных элементов, а путем специальной обработки кристалла в вакууме. Для оценки сложности ИС введен показатель степени интеграции  $k = \lg N$ , где  $N$  - число элементов в эквивалентной электрической схеме ИС. РЭА на основе ИС с  $k < 2$  называют аппаратурой III поколения.

Основой конструкции функционального узла повсеместно стала печатная плата. Конструкторские задачи при этом получили новую окраску, так как разработчики, стремясь удовлетворить возрастающие потребности потребителей, непрерывно наращивали сложность схем, осваивали новые частотные диапазоны, увеличивали быстродействие и т.д. Большой проблемой стало обеспечение соединений множества плотно упакованных ИС, усложнился отвод тепла. Коммутационные возможности одно- и двухсторонних печатных плат оказались недостаточными. Потребовалось создание многослойных печатных плат с числом слоев от четырех и более. Однако производство таких плат (особенно с числом слоев более 4-х) трудоемко, дает значительный процент брака и не всегда экономически оправдано.

Снизить коммутационную нагрузку на печатные платы, обеспечив при этом значительный выигрыш в массогабаритных характеристиках удалось в середине 70-х годов созданием микросборок (МС). Микросборка - это функциональный гибридный узел в микроэлектронном пленочном исполнении, создаваемый изготовителями РЭА, применительно к конкретным конструкциям и электрическим схемам. Практически на каждом крупном предприятии радиоэлектронного направления была освоена и широко использовалась тонкопленочная или толстопленочная технология изготовления МС. Мера эта во многом была вынужденной из-за ограниченной номенклатуры ИС, выпускаемых централизованно.

Существенное улучшение массогабаритных характеристик РЭС при переводе на МС достигается благодаря исключению навесных резисторов (резисторы являются частью печатного рисунка) и применения навесных элементов в бескорпусном исполнении. Бескорпусные ИС, транзисторы, диоды, конденсаторы вошли в каталоги централизованно поставляемой элементной базы, причем часть полупроводниковых устройств стала поступать на сборку в виде неразрезанных полупроводниковых пластин, содержащих десятки и сотни готовых элементов.

В последующие годы электронная промышленность продолжала расширять номенклатуру бескорпусных элементов и повышать степень интеграции ИС. В массовом производстве были освоены интегральные схемы с коэффициентом интеграции-4. Аппаратура с такими ИС относится к IV поколению

В 80-х годах получают некоторое развитие крупноформатные гибридно-интегральные узлы (УГИК), которыми предполагалось частично заменить печатные узлы. УГИК выполняются на металлической плате относительно больших размеров (например, 0x75 мм). Плата покрывается изоляционным слоем из стекломали, на поверхности которого выполнен

по технологии толстых пленок печатный рисунок, содержащий проводники, резисторы и некоторые конденсаторы. Большие размеры платы позволяют размещать на ней сложные схемы.

Во второй половине 80-х годов электронная промышленность продолжала наращивание степени интеграции ИС. Были освоены сверхбольшие интегральные схемы с коэффициентом интеграции 3-4 и выше. Началась эпоха аппаратуры V поколения.

## 2.2. Понятие конструкции и конструирования РЭС

Конструирование является частью общего процесса проектирования или разработки изделия, содержащего такие взаимосвязанные этапы, как разработка структурной и принципиальной электрических схем, собственно конструирования, разработка технологии изготовления, внедрение изделия в производство и эксплуатацию.

Под конструированием РЭС понимают мыслительную, оформительскую и организаторскую деятельность, содержанием которой является прогнозирование некоторой будущей структуры на основании современных данных, нахождение и отражение найденных связей между частями конструкции в конструкторской документации и внедрение ее в производство и эксплуатацию. Одним из наиболее важных результатов конструирования является получение новой информации, которую можно использовать в последующих разработках.

***Конструкцией РЭС** называется совокупность деталей и материалов с разными физическими свойствами, находящихся в определенной физической связи (электромагнитной, тепловой, механической), обеспечивающая выполнение заданных функции с необходимой точностью и надежностью в условиях внешних и внутренних воздействий и воспроизводимая в условиях производства.*

Конструкция определяет взаимное расположение частей в пространстве, способы их соединения, а также материал, из которого они изготовлены. Конструкция РЭС характеризуется:

- иерархической структурой, под которой подразумевается последовательное объединение более простых электронных узлов в более сложные;
- доминирующей ролью электрических и электромагнитных связей;
- наличием неоднородностей в электрических соединениях, приводящих к искажению и затуханию сигналов, а также паразитных связей, порождающих помехи (наводки);
- наличием тепловых связей, что требует защиты термочувствительных элементов;
- слабой связью внутренней структуры конструкции с ее внешним оформлением.

Структурное дробление конструкции дает экономические преимущества при разработке, производстве и эксплуатации РЭС и позволяет проводить параллельное конструирование и изготовление частей, а также существенно повышает ремонтпригодность. Параллельное конструирование и производство ускоряет проектирование РЭС в десятки раз. Ремонтпригодность повышается за счет упрощения поиска неисправности и возможности ремонта агрегатным способом, т.е. путем простой замены крупных частей.

## 2.3. Структура конструкций РЭС

Типовая структура конструкции современной РЭС состоит из элементной базы и трех уровней. Радиоэлектронный модуль третьего уровня (РЭМ) представляет собой

функционально законченное устройство, выполненное в виде шкафа, стойки или пульта на основе базовой несущей конструкции третьего уровня.

Несущей конструкцией называют механическую основу для закрепления частей конструкции (несущую на себе эти части). Современная система несущих конструкций РЭС унифицирована и предусматривает последовательную входимость конструкций низших уровней в конструкции высших уровней, что обеспечивается требованиями размерной совместимости. Базовыми несущими конструкциями третьего уровня являются кожухи, каркасы, монтажные рамы, корпуса шкафов, стоек, панели и корпуса пультов. Монтажной рамой называют несущую конструкцию открытого типа, содержащую элементы для электрического соединения и предназначенную для размещения нескольких элементов. Стойка монтажное устройство открытого типа для размещения блоков в несколько рядов, в котором в качестве несущей конструкции применена общая, вертикально расположенная рама. Стеллаж в отличие от стойки предназначен для размещения блоков закрытого типа (приборов) в несколько рядов. Шкаф подобен стойке, но является монтажным устройством закрытого типа и закрывается сплошной дверью. Панель является частью пульта и служит для размещения органов управления, коммутации и индикации. Другой частью пульта является корпус - несущая конструкция, предназначенная для размещения средств отображения информации, органов управления и необходимых блоков, микроблоков, ячеек и ЭРЭ.

Модуль второго уровня (РЭМ) - это блок или рама. Блоком называют часть РЭС, которая выполняет сложную функцию, содержит несколько модулей первого уровня и имеет лицевую панель.

Модуль первого уровня (РЭМ) - ячейка или плата. Элементную базу относят к нулевому уровню (РЭМ).

Отличительным признаком перехода от одного структурного уровня к другому, более высокому, служит сборочная операция, осуществляющая соединение одних частей конструкции с другими. Входение низших уровней в высшие не обязательно должно осуществляться строго по порядку номеров. Так, например, элементы нулевого уровня могут непосредственно входить в РЭМ, минуя первый и второй уровни. Низшие уровни конструкции (нулевой и первый) наиболее универсальны. Их конструкция мало зависит от конкретного назначения РЭС и объекта, на который аппаратура устанавливается. Высшие уровни специализированы, особенно третий уровень.

## **2.4. Основные задачи конструирования РЭС**

Главной целью процесса конструирования РЭС является создание малогабаритной, высокоэффективной и надежной аппаратуры, производство и эксплуатация которой требуют ограниченного расхода трудовых, энергетических и материальных ресурсов. Для достижения этой цели требуется решить три основные задачи современного конструирования РЭС: комплексной миниатюризации, охлаждения и повышения технологичности.

Основой при решении задачи комплексной миниатюризации РЭС является поиск резервов уменьшения габаритов и массы всех составных частей аппаратуры, включая соответствующий выбор элементной базы, систем питания, охлаждения, автоматики, антенных систем, органов настройки, регулировки и индикации и т.д. Поиск этого решения должен проводиться согласованно по схемотехническому и конструктивному направлениям. В конструкторском плане здесь выделяются три направления: структура конструкции, материалы и элементная база.

Наиболее объемным и сложным является вопрос об элементной базе. Все составляющие элементной базы должны быть технически совместимы друг с другом по входным и выходным параметрам, питанию, габаритным размерам, креплению, выводам. Сложность состоит в том, что элементная база для комплексной миниатюризации не возникает сама по себе, а этапы разработки и освоения новых изделий по

продолжительности порой соизмеримы с разработкой РЭА, для которой они заказаны. При параллельной разработке часто возникает необходимость в трудоемкой переделке конструкции при невозможности достижения заданных характеристик заказанных комплектующих или срыве сроков разработки новых элементов. Весьма плодотворна с конструкторской точки зрения идея включения в состав элементной базы комплектов ИС - групп нескольких взаимосвязанных ИС высокой степени интеграции, согласованных друг с другом по питанию, параметрам входа и выхода, функционированию и обеспечивающих при совместном включении в различных сочетаниях широкий набор сложных функциональных характеристик. Примером таких комплектов может служить 80 серия цифровых микросхем и 74 серия аналоговых. Эффективность использования комплектов ИС настолько высока, что комплект установленный на соединительной плате в РЭС V поколения в функциональном плане эквивалентен блоку в РЭС IV поколения или стойке в РЭС III поколения.

Задача охлаждения (или в более общей постановке - задача обеспечения заданного теплового режима) в современном сложном виде возникла как побочное следствие миниатюризации и повышения степени интеграции. Чем более миниатюрным является функциональный узел, тем выше удельная рассеиваемая мощность (если, конечно, не приняты специальные меры к снижению энергопотребления). Без тщательно продуманного и выполненного на должном уровне охлаждения нельзя обеспечить надежность и эффективность современных РЭС.

Задача обеспечения технологичности, т.е. пригодности РЭС к массовому производству, решается конструктором, прежде всего на основе унификации и стандартизации. Избыточное разнообразие конструкторских и схемотехнических решений резко снижает технологичность, увеличивает стоимость и сроки производства и, как следствие, приводит к снижению конкурентоспособности изделий.

## 2.5. Литература по теме

1. Гелль П.П., Иванов-Есипович Н.К. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. - Л.: Энергоатомиздат, 1984. - 536 с.

## 2.6. Вопросы для самопроверки

1. Назовите особенности аппаратуры первого и второго поколений
2. Назовите отличительные черты аппаратуры, и поколений
3. Дайте определение конструкции РЭС и перечислите ее особенности?
4. Какова структура современных РЭС?
5. Перечислите и охарактеризуйте основные задачи конструирования современных РЭС.

## **ЛЕКЦИЯ 3. ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИЯМ РЭС И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ**

*Основные требования, предъявляемые к РЭС: Противоречивость и разнообразие требований. Разбивка на группы. Требования по назначению. Требования по надежности. Требования безопасности, эргономики и эстетики. Требования технологичности и унификации. Патентно-правовые требования.*

*Климатическое исполнение и установка на объекте: Классификация вариантов климатического исполнения изделия. Категории размещения на объекте.*

*Классификация РЭС: Понятие категории, класса и группы. Класс наземной аппаратуры. Стационарная РЭА. РЭС для подвижных объектов. Носимая аппаратура. Бытовая РЭА. Класс морской аппаратуры. Судовые и корабельные РЭС. Буйковая аппаратура. Класс бортовой аппаратуры. Авиационные РЭС. Космическая и ракетная РЭА.*

### **3.1. Основные требования, предъявляемые к РЭС**

Многообразие выполняемых функций и условий эксплуатации предъявляет к конструкциям РЭС противоречивые требования. Это обстоятельство значительно осложняет труд конструктора. Для облегчения этой задачи требования к конструкциям объединяются в группы, стандартизируются и кодифицируются. Рассмотрим содержание и особенности различных групп требований.

Требования к конструкции РЭС по назначению. Эта группа требований устанавливает первичную задачу, ради которой собственно и ведется разработка. Общий перечень таких требований затрагивает широкий круг вопросов: функциональное назначение; параметр, определяющий конструкцию; класс объекта установки; климатическое исполнение; категория размещения на объекте; массогабаритные характеристики; закрепление на объекте; коммуникации на объекте; электромагнитная защита и т. д.

Требования к конструкции по надежности. Требования по надежности определяют стойкость аппаратуры к климатическим, механическим, биологическим и радиационным воздействиям, а также требования по безотказности долговечности, сохраняемости и ремонтпригодности.

Требования безопасности, эргономики и эстетики относятся к задаче совместимости конструкции РЭС с человеком при эксплуатации и ремонте с целью сохранения жизни и здоровья операторов и ремонтного персонала, снижения утомляемости.

Требования технологичности и унификации определяют приспособленность конструкции к ограниченному расходованию трудовых, материальных и энергетических ресурсов при подготовке производства и промышленном выпуске изделий в заданном количестве и определенной категории качества.

Патентно-правовые требования регламентируют условия, при которых принятые при разработке конструкции технические решения становятся промышленной собственностью с исключительным правом на нее предприятия-разработчика с вытекающим из этого экономическим и престижным эффектом.

Подробно содержание требований отдельных групп будет рассматриваться в последующих разделах курса. Здесь же познакомимся с наиболее общими, не зависящими от назначения аппаратуры требованиями первой группы.

### **3.2. Климатическое исполнение и установка на объекте**

#### Климатическое исполнение.

Стандартизация и кодификация климатического исполнения существенно упрощает задание соответствующих требований, так как позволяет четко представлять всю программу комплексного воздействия внешней среды в количественном выражении. Так, например, в зависимости от макроклиматического района, в котором будут эксплуатироваться РЭС, по ГОСТ 019-78 различают девять основных климатических исполнений изделий:

*Исполнение У* - для умеренного климата со среднегодовым максимумом и минимумом температуры +40 град. и -45 град.

*Исполнение УХЛ* - для умеренного и холодного климата при минимуме температуры ниже -45 град.

*Исполнение ТВ* - для влажного тропического климата с температурой +20 град. в сочетании с относительной влажностью 0 % и выше.

*Исполнение ТС* - для сухого тропического климата с температурой +40 град.

*Исполнение М* - для умеренно холодного морского климата при нахождении в морях и океанах севернее 30 град. с.ш. и южнее 30 град. ю.ш.

*Исполнение ТМ* - для тропического морского климата (между 30 град. с.ш. и 30 град. ю.ш.).

*Исполнение О* - общеклиматическое для суши.

*Исполнение ОМ* - общеклиматическое морское для судов с неограниченным районом плавания.

*Исполнение В* - всеклиматическое исполнение для суши и моря (за исключением Антарктиды).

#### Категории размещения на объекте

Укрупненные категории:	Дополнительные категории:
1: на открытом воздухе	1.1: для хранения и работы в помещении категории 4 и для кратковременной работы в других условиях, в том числе на открытом воздухе
2: под навесом и на объектах, где колебания температуры и влажности незначительно отличаются от условий открытого воздуха (навески и т.п.)	2.1: внутри изделия категорий размещения 1, 1.1, 2, но при условии исключения конденсации влаги
3: в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без кондиционирования	3.1: в нерегулярно отапливаемых помещениях (объектах)
4: в помещениях (объемах) с искусственным климатом	4.1: при кондиционировании или частичном кондиционировании 4.2: внутри промышленных отапливаемых зданий
5: в помещениях (объемах) с повышенной влажностью, приводящей к частой конденсации влаги на стенах и потолке	5.1: внутри изделий категории 5, но при условии исключения конденсации влаги на данном изделии

### 3.3. Классификация РЭС

Как правило, конструкции РЭС различного назначения, устанавливаемые на разные объекты значительно отличаются друг от друга, что вызвано спецификой назначения и особенностями эксплуатации. По мере развития комплексной миниатюризации происходит

постепенное стирание резких граней между различными видами радиоаппаратуры. Подобная универсализация предполагает разработку конструкций, пригодных для работы на любых объектах и в любых условиях. Для этого конструкция должна обладать функциональной избыточностью и соответствовать наиболее жестким условиям эксплуатации. Это может быть оправдано в тех случаях, когда достигается простыми средствами и позволяет значительно увеличить объем производства. Такая тенденция отчетливо прослеживается для электронно-вычислительной аппаратуры. Для остальных видов РЭС первостепенное значение сохраняет специализация, обусловленная тем, что объект установки задает специальное функциональное назначение для РЭС данной категории, класса или группы

### 3.3.1. Категории РЭС

По продолжительности работы РЭС принято разделять на четыре категории: многократного, однократного, непрерывного и общего применения. РЭА категории многократного применения способна выполнять свои функции несколько раз по мере необходимости, однократного - один раз за период эксплуатации. РЭС непрерывного применения предназначены для непрерывной работы за исключением периодов профилактики. РЭА общего применения работает в смешанном режиме, как, например, бытовая аппаратура.

### 3.3.2. Классы РЭС

Классы подразделяют РЭС по трем глобальным зонам использования: наземные РЭС (суша); морские (океан), бортовые (воздушное и космическое пространство).

Внутри классов в зависимости от объекта установки РЭС делятся на группы. Отличительный признак группы комплексный. Учитывается назначение и тактика использования, условия совместимости с объектом, требования к надежности, к защите от внешних воздействий и т.д.

#### **Класс 1 - наземные РЭС**

Включает три основные группы: стационарной, для подвижных объектов, носимой РЭА - и дополнительную группу бытовой РЭА.

Группа бытовой РЭА отличается спецификой применения в отличие от прочей РЭА, являющейся профессиональной. В настоящее время тенденция развития конструкций бытовой РЭА мирового класса направлена на профессионализацию, т.е. на конструирование ее по общим правилам для соответствующей основной группы класса.

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

#### **Стационарная аппаратура**

Эта группа характеризуется следующими отличительными признаками: - особой продолжительностью эксплуатации и необходимостью постепенной модернизации; - работой в помещении с нормальными климатическими условиями (температура 25±10 град. С; влажность 25±15 %; давление 1033±30 кПа); - отсутствием механических перегрузок во время работы; - транспортированием в амортизирующей упаковке; хранением в складских условиях в климатических зонах потребителя и изготовителя; - высокой ремонтпригодностью при ремонте на месте установки.

Для стационарной аппаратуры имеются ограничения (ГОСТ 12863-67) на габариты и массу одной стойки или шкафа, определяемые удобством транспортирования, выгрузки и перемещения внутри помещений. Сложная аппаратура этой группы (например, радиовещательные станции) должна предусматривать возможность постепенной модернизации путем незначительного усовершенствования, замены отдельных блоков, введения приставок и т.д.

Разновидностью стационарной РЭА является подгруппа переносной аппаратуры, куда относят лабораторную и медицинскую аппаратуру. Объектом установки в данном случае является поверхность стола, пола и т.п. Переносная РЭА всегда работает в комнатных условиях и не должна работать во время перемещения с места на место. Перенос должен осуществляться, как правило, одним-двумя человеками.

#### Аппаратура для подвижных объектов

Эта группа РЭС отличается тремя особенностями:

- повышенными требованиями к защите от вибраций и ударов, включая необходимость работы в условиях механических воздействий; - конструкция должна допускать погрузку и разгрузку легко расчленяемых частей силами двух человек; - усиленным воздействием абразивной дорожной пыли.

Сюда относят мобильные связные, радиолокационные и пеленгаторные станции, диспетчерские станции строительных, сельскохозяйственных и транспортных предприятий, включая железнодорожный транспорт, передвижные телевизионные студии, автомобильные приемники, магнитофоны и др.

Общая масса комплекса РЭС для одной автомашины должна составлять примерно 2/3 ее грузоподъемности; остальное идет на запас для проезда по плохим дорогам, на ЗИП и бытовое оборудование операторов. Масса каждого моноблока не должна превышать 60 кг для демонтажа в аварийных условиях. Другой особенностью РЭС, размещаемых в фургоне автомашины, является ограничение мощности рассеяния (до 1 кВт/м<sup>3</sup>).

#### Носимая аппаратура

Носимая РЭА характеризуется размещением ее на человеке и необходимостью защиты от случайных значительных ударов, неизбежных в полевых условиях (геологоразведка). К этой группе относятся станции ближней связи, портативные радиопеленгаторы, некоторые виды медицинской аппаратуры, различные виды измерительных приборов. Здесь очень важными являются эргономические требования. Например, человек может длительное время носить за плечами 10 кг, на ремне через плечо 3 кг, в кармане 0,7 кг. Весьма характерным для носимой аппаратуры является большая зависимость конструкции от габаритов и массы источников питания, а также усложненные условия эксплуатации в холодное время года (конденсация росы при внесении в теплое помещение).

#### Бытовая аппаратура

Отличительными особенностями бытовой радиоаппаратуры являются: - повышенное эстетическое значение внешнего вида и акустических данных; - приспособленность к эксплуатации совершенно неподготовленным человеком; - массовое или крупносерийное производство и определяющие значение стоимости.

Для поддержания спроса у населения используют три главных пути в развитии конструкций бытовой РЭА:

- создание принципиально новой РЭА, вызывающей новые потребности у человека, не зависящие от наличия у потенциальных покупателей старых конструкций;
- совершенствование ранее выпускавшихся конструкций с целью максимальной автоматизации управления и улучшения характеристик;
- повышение технологичности с целью снижения стоимости.

Особое значение для бытовой РЭС имеют вопросы технической эстетики. Мода и вкусы людей меняются часто, иногда значительно раньше, чем РЭС стареет по своим техническим характеристикам.

#### Класс 2 - морские РЭС

Этот класс включает три основные группы: судовую (пассажирские и грузовые суда), корабельную (надводные военные корабли и подводные лодки) и буйковую аппаратуру и отличается тремя особенностями: - комплексное воздействие климатических и механических факторов (100 %-ная влажность при повышенной температуре и солевом тумане в сочетании с непрерывной вибрацией от двигателей, ударными перегрузками и линейными

ускорениями); - длительное автономное плавание с отрывом от ремонтных баз; - акустические, магнитные и радиационные воздействия.

Морские РЭС должны разрабатываться в тропическом исполнении, предусматривать высокую коррозионную стойкость и плеснестойкость. Кроме того на случай прямого попадания воды должна обеспечиваться водозащищенность и брызгозащищенность. В ряде случаев морская РЭА предназначена для работы в погруженном в воду состоянии.

Отличительными чертами *судовой и корабельной аппаратуры* является: - высокий уровень типизации в целях упрощения снабжения судов запасными частями; - возможность ремонта на месте установки в условиях ограниченного пространства при минимальном количестве персонала и контрольно-измерительного оборудования без захода на ремонтную базу; - необходимость учета ограниченного размера люков и проходов на судне; - защита от сильных высокочастотных и низкочастотных (от гидроакустических станций) электромагнитных полей. Насыщенность современных судов различной аппаратурой столь высока, что обеспечение удовлетворительной электромагнитной совместимости возможно при принятии специальных мер при конструировании самого судна; - вибростойкостью (работа механизмов) и ударостойкостью при ударах волн и стрельбах, стойкостью к ускорениям, возникающим при качке. Радиолокационные установки, устройства передачи сигналов бедствия должны сохранять работоспособность в случае повреждения самого судна в результате столкновения или других аварийных ситуациях.

*Буйковая аппаратура* служит навигационным и другим целям и характеризуется: - особой продолжительностью необслуживаемой эксплуатации; - воздействием сильных ударов при волнении моря и постановке буя;

### **Класс 3 - бортовые РЭС**

Разделяется на группы авиационной, космической и ракетной техники. Отличительными особенностями класса являются существенные требования к массогабаритным характеристикам без снижения функциональных возможностей и обеспечение работоспособности в условиях пониженного давления (до 2 кПа на высоте 26 км).

*Авиационная аппаратура* характеризуется относительной кратковременностью непрерывной работы, измеряемой часами. В остальное время она находится под контролем персонала ремонтной базы: подвергается периодическому осмотру и контролю, перед каждым полетом проводится предполетная проверка. Конструкция такой аппаратуры должна обладать высокой контроле- и ремонтпригодностью, обеспечивая свободный доступ к внутренним частям для уменьшения времени на поиск неисправности.

Самолетная аппаратура подвергается значительным ударным и вибрационным воздействиям в широком диапазоне частот. Перепад температур также может быть очень большим. Так например, при стоянке в южных районах корпус самолета нагревается до + 50 град, а при полете на высоте 10 км температура за бортом опускается до -50 град. При разработке подобной аппаратуры следует также учитывать большую загруженность летчика процессом управления самолетом.

К *космическим и ракетным РЭС*, помимо общих требований к бортовому классу, предъявляют дополнительные и очень жесткие требования по ограничению массы и габаритов, обеспечению сверхвысокой безотказности, высокой ремонтпригодности в предстартовый период и стойкости к действию вибраций и линейных перегрузок при запуске. Вполне очевидно, что любые затраты на повышение показателей безотказности РЭС во время полета и ремонтпригодности в предстартовый период будут малы по сравнению с общей стоимостью запуска космического корабля. Поэтому функциональные узлы многих систем резервируются.

РЭС искусственных спутников Земли характеризуются: - особой продолжительностью необслуживаемой эксплуатации (годы); - работа в условиях атмосферы с постоянным газовым составом низкой влажности или в вакууме; - циклическим изменением температуры

в широком диапазоне; - отсутствием механических нагрузок во время работы; - опасностью воздействия радиации.

Дополнительными чертами *ракетных РЭС* являются:

- разовость использования;
- необходимость в особой кратковременности предстартовой проверки и высокой ремонтпригодности в предстартовых условиях;
- работа в условиях быстрого возрастания температуры обшивки ракеты до нескольких сотен градусов;
- длительная сохраняемость при многолетнем хранении;
- большие ударные нагрузки.

### 3.4. Литература по теме

1. Гелль П.П., Иванов-Есипович Н.К. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов.- Л.: Энергоатомиздат,1984. -36 с.

### 3.5. Вопросы для самопроверки

1. Назовите основные группы требований к конструкциям РЭС и охарактеризуйте их.
2. Назовите варианты климатического исполнения РЭС.
3. Как подразделяются РЭС по размещению на объекте?
4. Дайте понятие категории, класса и группы РЭС.
5. На какие группы разделяется класс наземных РЭС?
6. На какие группы разделяется морские РЭС?
7. Назовите отличительные признаки класса бортовой аппаратуры.

## **ЛЕКЦИЯ 4. КОНСТРУКТОРСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ**

***Введение:** Особенности конструирования РЭС. Определение конструкторской документации.  
**Стандарты:** Назначение стандартов. Категории стандартов. Системы стандартизации в РЭС.  
**Единая Система Конструкторской Документации:** Назначение ЕСКД. Классификация по группам. Обозначение стандартов.  
**Классификация и комплектность КД:** Графические и текстовые документы. Классификация по способу выполнения. Виды изделий. Основные комплекты КД.  
**Спецификация:** Назначение. Состав. Порядок заполнения отдельных разделов.*

### **4.1. Введение**

**К**онструирование - это один из основных этапов процесса проектирования РЭС, заключающийся в физическом воплощении принятых схмотехнических решений. От успешного решения задач конструирования в немалой степени зависят такие характеристики РЭС как быстродействие, надежность, объем, масса, технологичность, удобство эксплуатации.

Качество разработанной конструкции определяется степенью соответствия ее техническим требованиям. Несмотря на то, что конструктору в работе помогают системы автоматизированного проектирования, конструирование в известном смысле остается процессом проб и ошибок. Степень приближения конструкции к совершенному образцу определяется опытом, шириной и глубиной научного и технического кругозора конструктора.

Ошибочные конструкторские решения могут привести к снижению надежности РЭС из-за неудовлетворительного теплового режима, уменьшению быстродействия из-за значительной длины связей между элементами, ухудшению помехоустойчивости и т.д.

Для уменьшения вероятности разработки неудачного варианта РЭС конструирование изделий проводится в несколько стадий. При этом переход к более детальной проработке конструкции возможен только по завершении предшествующей разработки, проведенной в более общих чертах. Каждая стадия заканчивается представлением определенного комплекта конструкторской документации.

Конструкторской документацией называют графические и текстовые документы, которые в отдельности или вместе с другими документами дают необходимое представление о составе и устройстве изделий и их составных частей и содержат необходимые данные для их разработки и изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта. Состав комплекта конструкторской документации, а также правила его оформления, выпуска и обращения с ним, включая коррекцию для внесения изменений, исправлений и дополнений, строго регламентируются действующей системой стандартов.

### **4.2. Стандарты**

В конструировании РЭС большую роль играет система стандартов, помогающая разрабатывать качественные изделия. Существующие системы стандартов регламентируют многие стороны деятельности конструктора, оставляя вместе с тем большой простор для творческой инициативы.

Использование стандартов позволяет исключить несогласованность в работе различных подразделений разработчиков и производителей, избежать грубых ошибок в процессе производства и проектирования РЭС, существенно сократить строки и трудоемкость проектирования и производства изделия, обеспечить его надлежащее качество.

В общем случае стандартом называется совокупность правил, норм, требований, используемых при разработке и изготовлении конструкторской документации и производстве изделий.

Стандарты в России подразделяются на следующие категории:

- государственные стандарты (ГОСТ), обязательные для всех предприятий на территории России;
- отраслевые стандарты (ОСТ), обязательные для предприятий отдельной отрасли;
- республиканские стандарты (РСТ), обязательные для предприятий на территории данной республики;
- стандарты предприятий (объединений) (СТП), обязательные для применения только на данном предприятии.

В настоящее время на территории России действует 27 систем государственных стандартов, например:

- ГОСТ 1. Государственная система стандартизации (ГСС),
- ГОСТ 2. Единая система конструкторской документации (ЕСКД),
- ГОСТ 3. Единая система технологической документации (ЕСТД),
- ГОСТ15. Система разработки и поставки продукции на производство (СРПП),
- ГОСТ 19. Единая система программной документации (ЕСПД) и др.

### 4.3. Единая система конструкторской документации

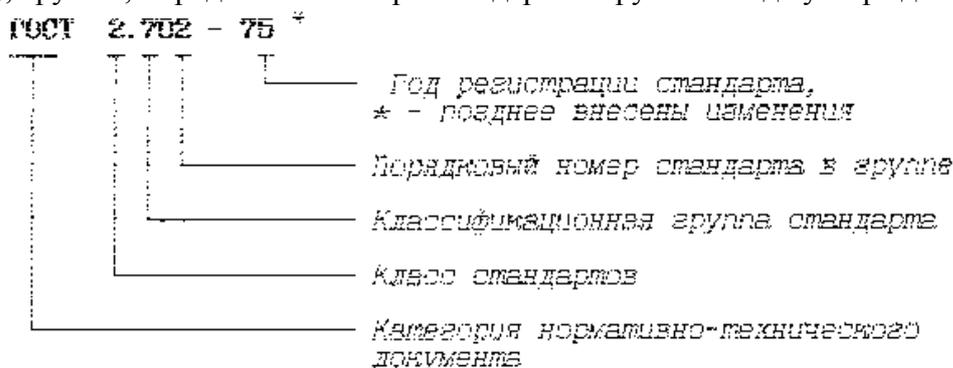
При разработке любых изделий одним из основных руководящих документов является Единая Система Конструкторской Документации (ЕСКД), представляющая собой комплекс государственных стандартов, устанавливающих единые взаимосвязанные правила и положения по порядку разработки, оформления и обращения конструкторской документации (КД).

ЕСКД является важнейшей системой постоянно действующих технических и организационных требований, обеспечивающий взаимообмен конструкторской документации без ее переоформления между отраслями промышленности и отдельными предприятиями. Она позволяет обеспечить расширение унификации при конструкторской разработке проектов промышленных изделий, упрощение форм документов и сокращение их номенклатуры, а также графических изображений, механизированное и автоматизированное создание документации и, самое главное, готовность промышленности к организации производства любого изделия на любом предприятии в наиболее короткие сроки.

Стандарты ЕСКД распределены по 10-ти классификационным группам:

0. Общие положения;
1. Основные положения;
2. Классификация и обозначение изделий в конструкторских документах;
3. Общие правила выполнения чертежей;
4. Правила выполнения чертежей изделий машиностроения и приборостроения;
5. Правила обращения конструкторской документации (учет, хранение, дублирование и внесение изменений);
6. Правила выполнения эксплуатационной и ремонтной документации;
7. Правила выполнения схем;
- 8, 9. Прочие стандарты.

Обозначение стандартов ЕСКД включает указание категории стандарта (ГОСТ), системы (2), группы, порядкового номера стандарта в группе и года утверждения стандарта,



например, стандарт ЕСКД "Правила выполнения электрических схем имеет следующее обозначение

#### 4.4. Классификация и комплектность КД

Виды конструкторских документов определяются ГОСТ 2.102-68 "Виды и комплектность конструкторской документации".

По оформлению все конструкторские документы делятся на графические и текстовые, по стадии проектирования - на проектные и рабочие, по способу выполнения и характеру использования - на оригиналы, подлинники, дубликаты и копии.

В графических документах с помощью установленных стандартом символов и правил поясняется устройство, принцип действия и связи между отдельными частями изделия. К графическим документам относятся: - чертеж детали, на котором представлено ее изображение и все необходимые данные, необходимые для изготовления и контроля; - сборочный чертеж (СБ), содержащий изображение изделия и данные, требующиеся для его сборки и контроля; - чертеж общего вида (ВО), изображающий конструкцию изделия и дающий представление о его составе, взаимодействиях основных частей и принципе работы; - теоретический чертеж (ТЧ), представляющий геометрическую форму изделия и координаты его основных частей; - габаритный чертеж (ГЧ), изображающий в упрощенном виде изделие с габаритными, установочными и присоединительными размерами; - монтажный чертеж (МЧ), содержащий упрощенное изображение изделия и данные для его монтажа; - схемы: структурная (Э1), функциональная (Э2), принципиальная (Э3), соединений (Э4), подключений (Э5), общая (Э6), расположения (Э7).

Схемы электрические структурные определяют основные части изделия, их назначения и служат для общего ознакомления с изделием. На структурной схеме раскрывается не принцип работы отдельных функциональных частей, а только взаимодействие между ними. Поэтому составные части изделия изображаются в виде прямоугольников различной формы, однако допускается также применять условные графические обозначения элементов. На линиях взаимосвязи стрелками указывают направление хода процессов, происходящих при работе изделия. На структурной схеме в виде таблицы обычно указываются наименования функциональных частей изделия. Кроме того, допускается на структурной схеме помещать поясняющие надписи, диаграммы, таблицы, а также указывать электрические параметры (значения токов, уровни напряжений) и формы сигналов в определенных точках схемы.

Схемы электрические функциональные предназначены для пояснения определенных процессов. Эти схемы используются при изучении принципов работы изделия, его настройке, регулировке, контроле (приемке) и ремонте. По сравнению со структурной схемой функциональная схема более подробно раскрывает функции отдельных элементов и устройств. Графическое построение функциональной схемы должно давать наиболее наглядное представление о процессах, отображаемых на схеме. Обычно функциональные схемы используются совместно с принципиальными, поэтому перечень элементов для функциональной схемы не составляется. На функциональных схемах полезно указывать технические характеристики функциональных частей (например, коэффициент усиления усилителя, полосу и порядок фильтра и т.п.), помещать диаграммы и таблицы, а также параметры в характерных точках.

Схемы электрические принципиальные определяют полный состав изделия и дают детальное представление о принципе его работы. На основе схемы электрической принципиальной разрабатывают целый ряд других конструкторских документов: схемы соединений, чертежи печатных плат, перечни элементов и т.д. На схеме электрической принципиальной изображают все электрические элементы и устройства, необходимые для осуществления и контроля в изделии соответствующих электрических процессов. Элементы изображают в виде условных графических обозначений (УГО) в соответствии с ГОСТ. Каждый элемент схемы электрической принципиальной должен иметь позиционное

буквенно-цифровое обозначение в соответствии с ГОСТ 2.710 - 81. Порядковые номера элементам присваивают, начиная с единицы в пределах группы элементов, имеющих одинаковые буквенные обозначения (R1, R2 и т.д., DD1, DD2 и т.д.). Порядковые номера присваивают в соответствии с последовательностью расположения элементов или устройств на схеме: сверху вниз, в направлении слева направо. Позиционное обозначение проставляют рядом с графическим обозначением элемента с его правой стороны или над ним. При изображении на схеме элемента разнесенным способом его позиционное обозначение проставляют около каждой части (например, DD1.1, DD1.2 и т.д.). Обязательным документом, выпускаемым совместно со схемой электрической принципиальной, является перечень элементов (ПЭЗ). В соответствующих ГОСТах определены правила его выполнения.

При выполнении схемы электрической принципиальной на поле схемы допускается помещать такие текстовые данные, как указания о марках, сечениях и расцветке кабелей, требованиях к электрическому монтажу, указания о назначении отдельных цепей (например, о питании микросхем).

Если схема электрическая принципиальная выполняется на нескольких листах, то соблюдается сквозная нумерация и составляется общий перечень элементов.

Схема соединений (монтажная) показывает соединения составных частей изделия и определяет провода, жгуты, кабели или трубопроводы, которыми осуществляются эти соединения, а также места их присоединений и ввода. На схеме изображают все устройства (в виде прямоугольников) и элементы (в виде условных обозначений), входящие в состав изделия, их входные и выходные элементы (разъемы, зажимы и т.п.) и соединения между ними.

Схема подключения показывает внешние подключения изделия. На схеме изображают изделие (в виде прямоугольника), его входные и выходные элементы и подводимые к ним концы проводов и кабелей внешнего монтажа, около которых помещают данные о подключении изделия (характеристики внешних цепей, адреса).

Общая схема определяет составные части комплекса и соединения их между собой.

Схема расположения определяет относительное расположение составных частей изделия, а при необходимости, также проводов, жгутов, кабелей, трубопроводов. Используется при эксплуатации и ремонте.

Схемы выполняют без соблюдения масштаба, действительное расположение составных частей (например, компонентов на плате) не учитывается или учитывается лишь приближенно. Электрические элементы и устройства на схеме изображают в состоянии, соответствующем обесточенному (например, нормально замкнутые или нормально разомкнутые контакты реле). Элементы, которые приводятся в действие путем механических перемещений (выключатели, кнопки и т.п.), изображаются на схемах в нулевом или отключенном положении. В противном случае требуется поместить текстовое примечание в поле схемы.

Форматы листов выбирают в соответствии с ГОСТ 2.301 -68 и ГОСТ 2.004 -79. При выборе форматов схемы следует учитывать объем и сложность схемы, условия ее хранения и обращения, возможность внесения изменений, особенности периферийного оборудования для вывода схем на бумажный носитель. По мнению автора, при выводе чертежей удобно (но, к сожалению, дорого) использовать струйные плоттеры фирмы Hewlett-Packard, однако в ряде случаев хорошим выходом из положения являются струйные принтеры формата А3 компаний Hewlett-Packard или Epson. В этом случае можно либо пойти по пути склеивания схемы большого формата (А2 и А 1) из нескольких листов, либо, что во многих случаях оказывается более выгодным, выполнять многолистовую схему. Выбранный формат должен обеспечивать компактное выполнение схемы, не уменьшая при этом наглядности представления и удобства пользования.

При выполнении многолистовой схемы рекомендуется на каждом из листов выполнять вполне законченную функциональную цепь (например, схему аналогового тракта, схему узла

цифровой обработки, узла питания), а не разбивать произвольно схему на листы без какой-либо функциональной связи.

Линии на схемах всех типов выполняются в соответствии с ГОСТ 2.303-68. Толщина линии выбирается в пределах от 0,2 до 1 мм и выдерживается постоянной во всем комплекте схем на изделие. Как условные графические обозначения, так и соединения выполняются линиями одинаковой толщины. Как правило, утолщенными линиями изображаются общие шины (жгуты). Тип линии зависит от изображаемого объекта. Так, электрические связи, условные графические обозначения элементов и т.п. изображаются сплошными линиями. Электрические и магнитные экраны, механические связи (например, якорь и контакты реле) изображаются штриховыми линиями. Условные границы устройств, функциональных групп обозначаются штрих-пунктирной линией. Допускается выделять утолщенной линией отдельные электрические цепи, например силовые.

Номера действующих ГОСТов, определяющих правила выполнения схем, приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Номер ГОСТа	Название
ГОСТ 2.701	Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению
ГОСТ 2.702	Правила выполнения электрических схем
ГОСТ 2.705 1 с	Правила выполнения электрических схем обмоток и изделий обмотками
ГОСТ 2.708	Правила выполнения электрических схем цифровой вычислительной техники
ГОСТ 2.709	Система обозначения цепей в электрических схемах
ГОСТ 2.710	Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах

На электрической схеме любого типа изображают элементы и устройства (либо в виде условных графических обозначений, либо в виде прямоугольников), линии взаимосвязи, буквенно-цифровые обозначения, таблицы, текстовую информацию (например, о питании интегральных микросхем) и помещают основную надпись.

Условные графические обозначения (УГО) элементов выполняются в соответствии с ЕСКД. Номера соответствующих ГОСТов приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

ГОСТ 2.711	Схема деления изделия на составные части
ГОСТ 2.721	Обозначения общего применения
ГОСТ 2.722	Машины электрические
ГОСТ 2.723	Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители
ГОСТ 2.725	Устройства коммутирующие
ГОСТ 2.726	Токосъемники
ГОСТ 2.727	Разрядники, предохранители
ГОСТ 2.728	Резисторы, конденсаторы
ГОСТ 2.729	Приборы измерительные
ГОСТ 2,730	Приборы полупроводниковые
ГОСТ 2.731	Приборы электровакуумные
ГОСТ 2.732	Источники света
ГОСТ 2.733	Обозначения условные детекторов ионизирующих излучений в схемах
ГОСТ 2.734	Линии сверхвысокой частоты и их элементы
ГОСТ 2.735	Антенны

ГОСТ 2.736	Элементы пьезоэлектрические и магнитострикционные. Линии задержки
------------	--

При выполнении схемы между соседними линиями УГО устанавливается просвет не менее 1 мм, между отдельными УГО — не менее 2 мм, между соседними линиями связи (цепями) — не менее 3 мм. Очевидно, что линии соединений должны состоять из горизонтальных и вертикальных отрезков, в виде исключения для некоторых схем (мультивибраторы, триггеры и т.д.) допускается выполнение линий связи под углом 45°. Линии должны иметь минимальное количество изломов и взаимных пересечений.

Для уменьшения количества линий и повышения читаемости и наглядности схемы рекомендуется использовать слияние линий в групповые линии связи (шины, жгуты). При этом каждая линия в месте слияния должна быть помечена порядковым номером. Очень часто вместо порядкового номера используют обозначения, например DO, DI, RESET, CS и т.д. В большинстве случаев служба нормоконтроля воспринимает подобное обозначение. Линии групповой связи, как правило, выполняются утолщенными. Подходящие к ним линии могут изображаться либо под прямым углом, либо с изломом под углом 45°.

**Текстовые документы** содержат описания: устройства, принципа действия и эксплуатационных показателей изделия, состава конструкторской документации. К текстовым документам относятся: - спецификации, определяющие состав сборочной единицы, комплекса или комплекта. - ведомости: спецификаций (ВС); ссылочных документов (ВД); согласования применения изделий (ВИ); покупных изделий (ВП); держателей подлинников (ДП); технического предложения (ТП), эскизного (ЭП) и технического (ТП) проектов. Ведомости содержат перечни спецификаций, ссылочных документов и т.д. - пояснительная записка (ПЗ), содержащая описание устройства, принципа действия изделия, а также обоснование принятых при его разработке технико-экономических решений. - технические условия (ТУ), задающие все требования к изделию, его изготовлению, комплектации, приемке, поставке и эксплуатации. - программа и методика испытаний, содержащая перечень проверяемых технических характеристик изделия, порядок и методы их контроля. В зависимости от назначения и сложности изделия может составляться отдельно программа испытаний (ПИ), методика испытаний (МИ) или объединенный документ, содержащий и программу и методику испытаний (ПМ). - среди оставшихся текстовых документов отметим расчеты (РР), формуляры (ФО), паспорт (ПС), патентный формуляр (ПФ). Последний документ отражает оценку патентоспособности, патентной чистоты и технического уровня изделий, материалов, технологических процессов, методов измерений и испытаний.

По способу выполнения и характеру использования установлены следующие виды конструкторской документации: оригиналы, дубликаты, подлинники, копии

**Оригиналом** называют первичный документ (так называемый "белок"), предназначенный для изготовления по нему подлинника и заверенный подписями лиц, ответственных за выпуск документа. На левом поле листа ставит свою подпись нормоконтролер.

**Подлинником** называют воспроизведенный с оригинала документ, выполненный на материале, допускающем многократное копирование и компактное хранение в архиве. Воспроизведение осуществляется со всеми подписями, заверяющими оригинал. Нормоконтролер сличает подлинник с оригиналом во избежание технических дефектов, которые могли возникнуть при воспроизведении и ставит свою подпись в соответствующей графе основной надписи документа. Обычно подлинник выполняют на кальке с помощью электрографической машины. Если оригинал пригоден для микрофильмирования

подлинником может стать микрофильм. После сдачи подлинника в архив оригинал может быть уничтожен.

Дубликат представляет собой копию подлинника, обеспечивающую его идентичное воспроизведение и пригодную для снятия копий.

Копией называют документы, воспроизведенные с подлинника или дубликата и предназначенные для непосредственного использования при разработке, в производстве, при эксплуатации и ремонте. Ученными копиями называют документы, которые зарегистрированы на предприятии-держателе подлинников, что обеспечивает отражение в них всех изменений, вносимых в подлинник.

По ГОСТ 2.102-68 различают три варианта комплектности конструкторской документации на изделие: основной конструкторский документ, основной комплект конструкторских документов и полный комплект конструкторских документов

Напомним, что согласно ГОСТ 2.101-68:

**деталь** - это изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала, без применения сборочных операций (валик, винт, отрезок коаксиального кабеля);

**сборочная единица** - это изделие, составные части которого подлежат соединению на предприятии-изготовителе сборочными операциями;

**комплекс** - два и более изделий (состоящих, в свою очередь, из двух и более частей), не соединенных на предприятии изготовителе сборочными операциями, но предназначенный для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций;

**комплект** - два и более изделий, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющими набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера.

Основной конструкторский документ в совокупности с поименованными в нем конструкторскими документами полностью и однозначно определяет данное изделие и его состав. Для деталей основным конструкторским документом является чертеж, а для сборочной единицы, комплекса и комплекта - спецификация.

В основной комплект конструкторской документации входят документы, составленные на изделие в целом: СБ, схемы, ТУ и т.д. Документы на составные части в основной комплект не включаются!

Полный комплект содержит кроме основного комплекта документации на изделие основные комплекты на составные части.

Документы, включаемые в полный комплект, принято разделять на группы: конструкторские графические (семь наименований), конструкторские текстовые (семь наименований), эксплуатационные текстовые (пять наименований) и ремонтные текстовые (один документ).

## 4.5. Спецификации

Спецификация является основным конструкторским документом на изделие сборочного производства. Оформляется этот документ в соответствии с ГОСТ 2.108-68\*.

Составляют спецификацию на отдельных листах формата А4 по формам (первый лист) иа (последующие листы). Спецификация состоит из следующих разделов:

- документация;
- комплексы;
- сборочные единицы;
- детали;
- стандартные изделия;
- прочие изделия;
- материалы;
- комплекты.

Наличие тех или иных разделов определяется составом изделия.

Наименование каждого раздела указывают в виде заголовка в графе "Наименование" и подчеркивают, например

Сборочные единицы.

Между заголовком и разделом принято оставлять 1-2 пустых строчки, между разделами - 2-3 строчки.

В раздел "Документация" вносят документы, составляющие основной комплект конструкторских документов специфицируемого изделия, кроме его спецификации, ведомости эксплуатационных документов и ведомости документов для ремонта.

В разделы "Комплексы", "Сборочные единицы" и "Детали" вносят комплексы, сборочные единицы и детали, непосредственно входящие в специфицируемое изделие. Запись изделий рекомендуется проводить в алфавитном порядке сочетаний букв кодов организаций-разработчиков, в пределах этих кодов - в порядке возрастания классификационной характеристики или в порядке возрастания порядкового регистрационного номера.

В разделе "Стандартные изделия" записывают изделия, примененные по ГОСТам, ОСТам, СТП (для изделий вспомогательного производства). В пределах каждой категории стандартов запись проводят по группам изделий, объединенных по функциональному признаку (например, крепежные изделия, электрические изделия и др.); в пределах каждой группы - в алфавитном порядке наименований изделий; в пределах наименования - в порядке возрастания номеров стандартов; в пределах каждого номера стандарта - по возрастанию параметров изделий (емкостей, сопротивлений и др.).

В раздел "Прочие изделия" вносят изделия, примененные по техническим условиям. Запись проводят по однородным группам (резисторам, конденсаторам и т. д.) в пределах каждой группы в алфавитном порядке наименований изделий, в пределах каждого наименования - в порядке возрастания основных параметров.

Порядок записи однородных групп в двух последних разделах в стандарте не определяется! Кроме того само понятие "однородная группа" несколько расплывчато.

В раздел "Материалы" вносят все материалы, непосредственно входящие в специфицируемое изделие. Последовательность записи следующая: - металлы черные; - металлы магнитоэлектрические и ферромагнитные; - металлы цветные, благородные, редкие; - кабели, провода, шнуры; - пластмассы и пресс-материалы; - бумажные и текстильные материалы; - лесоматериалы; - резиновые и кожевенные материалы; - минеральные, керамические и стеклянные материалы; - лаки, краски, нефтепродукты; - прочие материалы. В этот раздел не записывают те материалы, необходимое количество которых не может быть определено конструктором по размерам изделия, а назначается технологом. К таким материалам относятся, например, припой, краски, лаки, клей, смазки, электроды, замазки. Указание о необходимости применения этих материалов дается в технических требованиях на поле чертежа.

#### 4.6. Литература по теме

1. Государственные стандарты СССР. Единая система конструкторской документации.
2. Александров К.К., Кузьмина Е.Г. Электротехнические чертежи и схемы.- М.: Энергоатомиздат, 1990.-88 с.

#### 4.7. Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение конструкторской документации
2. Укажите назначение стандартов. Приведите примеры систем стандартов.
3. Для каких целей используется и как построена ЕСКД?
4. По каким признакам классифицируется конструкторская документация?

5. Назовите основные виды графических и текстовых конструкторских документов. Охарактеризуйте их.
6. Как различается КД по комплектности?
7. Как заполняется спецификация?

## **ЛЕКЦИЯ 5. ПЕЧАТНЫЙ МОНТАЖ В РЭС**

***Введение:** Способы обеспечения электрических связей в РЭС. Влияние конструкции соединений на параметры РЭС. Печатный и проводной монтаж.*

***Печатные схемы:** С чего все началось? На стыке направлений. Преимущества печатных схем. Технологические трудности. Печатные платы. Определение печатной платы. Технологические операции, необходимые для ее изготовления.*

***Компоненты печатных плат:** Подложки. Печатные проводники. Формирование рисунка проводников.*

### **5.1. Введение**

Характерной особенностью РЭС является наличие большого количества электрических связей между отдельными компонентами, конструкция которых в значительной степени определяет эффективность и качество изделий РЭС. Искажение, затухание и задержка непрерывного или дискретного сигнала при распространении в электрической линии связи, а также перекрестные помехи могут нарушить нормальное функционирование РЭС. Трудоемкость работ по осуществлению электрических связей в производстве РЭС составляет от 30 до 40 % общей трудоемкости изготовления изделия. От качества электромонтажных работ в значительной степени зависят не только стоимость, но и надежность РЭС при эксплуатации, масса и габариты аппаратуры. Поэтому неудивительно, что значительные усилия конструкторов и технологов направлены на совершенствование и развитие способов межконтактных соединений. Используемые к настоящему времени способы осуществления электрических соединений можно разделить на две большие группы: соединения объемным проводом (шлейфами) и печатным монтажом.

Первоначальный этап производства радиотехнических устройств характеризовался применением отдельно изготавливаемых радиодеталей (элементов РЭА) с последующей сборкой их в законченное устройство путем механического закрепления на специальном шасси и электрического соединения с помощью проволочного монтажа. В процессе изготовления РЭА преобладал ручной труд как при изготовлении деталей, так и при их сборке. В последствии это конструктивно-технологическое направление стали называть - "проволочным монтажом дискретных навесных элементов". Такой вид монтажа в настоящее время используется при изготовлении несложных любительских, опытных, мелкосерийных или специализированных конструкций РЭА, так как он требует минимальной оснащенности производственных участков и цехов.

Объемные провода в современных конструкциях чаще всего используются для межблочных и межстоечных соединений, удельный вес которых сравнительно невелик. Соединения же отдельных компонентов друг с другом в подавляющем большинстве конструкций осуществляется печатным монтажом.

### **5.2. Печатные схемы**

Началом развития техники печатных схем принято считать 40-е годы, когда фирмой "Глоуб Юнион" был разработан и запущен в промышленное производство бесконтактный взрыватель для мин и зенитных снарядов. Радиоустройство взрывателя включало, среди прочих элементов, плоскую керамическую пластину, на которой способом печати через трафарет было выполнено несколько композиционных резисторов, соединенных печатными проводниками. Эти пластины были названы печатными схемами, так как при их изготовлении использовался способ печати через трафарет, а сами они выполняли функции отдельных участков общей схемы устройства. Справедливости ради следует отметить, что устройства выполненные аналогичными способами предлагались и раньше (например, трансформатор Тесла, монтажные плиты), но не они не были реализованы в промышленном масштабе.

С точки зрения технологии, операции процесса изготовления печатных схем не являлись открытием. Нанесение на керамические поверхности серебросодержащих паст с последующим их обжиганием и получением токопроводящей пленки достаточно широко использовалось в промышленности, в том числе при получении контактных площадок резисторов и конденсаторов. Композиционные пасты также использовались при изготовлении резисторов. И, наконец, трафаретную печать, или получение рисунка с помощью трафарета, широко использовали в полиграфическом, текстильном и других производствах, в том числе и в приборостроении при изготовлении различных шкал, шильдиков и т.д. Новизна печатных схем заключалась в конструктивном оформлении группы радиоэлементов, изготавливаемых в едином технологическом цикле, на единой подложке и выполняющих определенную функцию схемы.

Технической предпосылкой появления печатных схем следует считать назревшую к тому времени необходимость увеличения плотности размещения элементов схем в устройствах, особенно военного назначения, снижения массы устройств, удельной стоимости элементов схем и трудоемкости сборки. Применение техники печатных схем позволяло решить эти задачи.

Основными особенностями техники печатных схем по сравнению с техникой проволочного монтажа дискретных элементов следует считать следующие:

- выполнение элементов схемы в виде участков пленочного покрытия, нанесенного на поверхность изоляционного материала (подложки);
- групповое изготовление однотипных элементов, расположенных в одном слое;
- применение в процессе изготовления элементов схем тех или иных способов печати для оформления конфигурации элементов;
- закрепление элементов на подложке и относительно друг друга в процессе изготовления;
- электрическое соединение элементов в процессе изготовления печатной схемы;
- объединение в технологическом процессе изготовления печатных схем разнотипных технологических операций.

Попытки изготовления радиотехнических устройств с полным выполнением электрической схемы в виде печатной предпринимались уже с середины 50-х годов, но все они оказались безуспешными. Причиной этого являлась недостаточная проработанность технологических операций и отсутствие материалов с нужными свойствами. Технологические трудности привели изготовителей к использованию лишь тех элементов, изготовление которых экономически оправдывалось. Так, в СССР в конце 40-х годов был разработан переносный радиоприемник, в котором печатная схема содержала около двух десятков резисторов, соединенных печатными проводниками. Для его производства была создана специальная автоматическая линия, и в середине 40-х годов этот приемник под маркой "Дорожный" выпускался серийно.

### **5.3. Печатные платы**

Наиболее простыми элементами, изготавливаемыми с применением техники печатных схем, являются соединительные проводники между радиоэлементами. Требования к проводникам значительно проще, чем к радиоэлементам, а возможности их изготовления существенно шире. Оказалось, что применение дискретных элементов, устанавливаемых на изоляционную пластину с печатными проводниками, дает существенный экономический выигрыш. В отличие от печатных схем изоляционную пластину с печатными проводниками стали называть печатной платой, а соединение элементов с ее помощью - печатным монтажом

С точки зрения технологии печатная плата как изделие представляет собой пластину из диэлектрического материала, на которой расположены и закреплены плоские участки токопроводящего покрытия, обеспечивающего соединения отдельных электрорадиоэлементов, устанавливаемых на печатную плату. Следовательно, для изготовления печатной платы необходимо:

- получение плоской изоляционной пластины (подложки); - получение плоского токопроводящего покрытия; - закрепление токопроводящего покрытия на подложке; - создание рисунка токопроводящего покрытия. Если токопроводящий рисунок выполняется на обеих сторонах подложки, к перечисленным операциям добавляется процесс создания токопроводящих перемычек, проходящих через толщину платы.

Перечисленные технологические операции не требуют жесткой последовательности выполнения, к тому же они находятся на стыке нескольких технических направлений. Эти обстоятельства обусловили безудержный поток предлагаемых вариантов, как прежде, так и в настоящее время. К примеру, в конце 0-х годов уже было запатентовано свыше 00 (!) способов изготовления печатных плат. Патентовалось все - материалы, последовательность действий, режимы, способы обработки и т.д. Заявки на новые способы продолжают поступать и в настоящее время. Однако лишь немногие из запатентованных способов выдержали проверку временем и широко используются в современном производстве.

#### **5.4. Компоненты печатных плат**

Исторически, технология изготовления печатных плат, как и все в технике, развивалась от простого к сложному, постепенно усложняясь с увеличением требований к параметрам плат. Так, один из первых аналогов печатной платы изготавливался способом выдалбливания канавок на мраморной плите с последующей заливкой их оловом.

Последующие изменения касались как материала изоляционного основания (подложки) или способов нанесения и материала проводников, так и особенностей технологического процесса изготовления печатной платы.

##### **5.4.1. Подложки**

В связи с использованием высокотемпературных способов формирования проводящего покрытия подложки для первых печатных плат выполнялись из керамики. Однако последующее увеличение габаритных размеров подложек заставило технологов искать материалы более устойчивые к механическим воздействиям и более легко обрабатываемые механическим путем. Таковыми оказались полимерные (пластмассовые) материалы, которые в процессе развития также претерпевали изменения.

Первоначально подложки стали делать из конструкционных пластмасс путем прессования в специальных пресс-формах. В некоторых технологических вариантах процесс изготовления подложки совмещался с процессом создания рисунка будущих проводников путем формирования канавок на поверхности подложки. В других вариантах этот процесс совмещали с процессом металлизации поверхности подложки путем использования металлических порошков, металлической фольги или солей металла, впоследствии химически восстанавливаемых до металлического состояния. В качестве материала подложки использовали полимерные материалы с различными наполнителями - от древесных опилок до стекловолокна.

В дальнейшем подложки стали изготавливать средствами механической обработки из листовых пластмасс, в качестве которых на первых порах широко использовались гетинакс (материал на основе бумаги, пропитанной фенолформальдегидной смолой и спрессованной в лист определенной толщины) и текстолит (материал на основе хлопчатобумажной ткани, пропитанной той же смолой и спрессованной в форме листа). Подложки из этих материалов обходились дешевле, что и обусловило их широкое применение.

В настоящее время номенклатура листовых изоляционных материалов для изготовления печатных плат значительно расширена за счет применения полиэфирных смол и композиций из фенольных, креозольных и эпоксидных смол, а также наполнителей с улучшенными механическими и изоляционными характеристиками (стеклоткань или полимерные пленочные материалы).

В процессах производства печатных плат широкое распространение нашел листовой изоляционный материал (фольгированный диэлектрик), при изготовлении которого методом прямого прессования к нему одновременно приклеивается и металлическая фольга. Производство различных разновидностей фольгированных материалов в промышленно развитых странах организовано в массовом масштабе на специализированных предприятиях.

#### **5.4.2. Пленочные проводники**

Процессы получения пленочного токопроводящего покрытия, применяемые при изготовлении печатных схем и печатных плат, еще более разнообразны, чем процессы изготовления подложек.

Способ вжигания серебросодержащих паст на поверхность керамики первоначально нашел широкое применение, что обусловлено прежде всего простотой процесса, высокой прочностью сцепления покрытия с поверхностью подложки, его достаточной электропроводностью. Для изготовления печатных схем, содержащих проводники и резисторы этот процесс в наибольшей степени отвечал требованиям массового производства. Пасты наносились через металлические сетчатые трафареты, несущие рисунок проводников и резисторов. Затем платы подвергались высокотемпературному обжигу в специальных печах. Впоследствии, при развитии техники изготовления микросхем, этот процесс назвали "технологией толстых пленок" и стали широко использовать при изготовлении гибридных интегральных схем. В технологии печатных плат он использовался лишь первое время и был вытеснен другими способами.

Способ вакуумной металлизации, заимствованный из технологии вакуумных приборов и технологии пленочных сопротивлений, заключается в испарении металла в вакууме и конденсации его на поверхности подложки. Он позволяет получить тонкие и равномерные покрытия с заданной электропроводностью. Однако использование сложного оборудования, высокие требования к качеству и чистоте поверхности подложки, высокая температура нагрева подложки ограничили использование этого способа в технологии печатных плат. В дальнейшем этот способ, названный "вакуумное напыление" получил широкое распространение при изготовлении микросхем на активных и пассивных подложках ("технология тонких пленок").

Способ шоопирования заключается в распылении частиц расплавленного металла воздухом или инертным газом и нанесении его на изоляционную подложку с канавками для проводников с последующим удалением излишков металла с поверхности платы шлифовкой или каким-либо другим способом. Он достаточно широко обсуждался как возможный способ получения токопроводящих покрытий при изготовлении печатных плат как на керамических, так и на пластмассовых подложках. Однако практического применения этот способ не получил, так как не обеспечивал равномерности покрытия по толщине, а следовательно, и по электропроводности.

Способы металлизации с помощью металлических порошков предлагались как на начальном этапе освоения техники печатных плат, так и предлагаются в различных вариантах до настоящего времени. Эти способы представляют различные варианты закрепления металлического порошка на поверхности изоляционного материала либо в процессе изготовления подложки из конструкционных или листовых пластмасс, либо в процессе металлизации готовых подложек путем напыления порошка на покрытую клеевым составом поверхность подложки, путем тиснения специальным пуансоном рисунка схемы на подложку с порошковым покрытием или введением порошка в полимерное связующее и нанесением его через трафарет. Наибольшее распространение этот способ нашел при изготовлении различных композиций для резисторов. В технике изготовления печатных плат он имеет ограниченное применение.

Способ химической металлизации заключается в осаждении на предварительно обработанной изоляционной поверхности металлического покрытия путем химического

восстановления металла из раствора его соли. В результате на поверхности платы осаждается тонкий и достаточно равномерный слой металла. В силу специфических условий осаждения он имеет повышенное электросопротивление, но по нему может быть дополнительно проведено гальваническое осаждение металла. В технике печатных плат химические способы металлизации получили широкое распространение, их развитию и разработке уделялось и уделяется в настоящее время очень большое внимание в силу того, что способ не требует высоких температур обработки и позволяет металлизировать любые изоляционные поверхности. В качестве химически осаждаемого металла наибольшее применение получила медь, но наряду с ней патентовались и способы осаждения серебра, кобальта, никеля и некоторых других металлов.

Способ металлизации путем приклеивания к изоляционной поверхности металлической фольги получил наибольшее распространение при изготовлении печатных плат. Основные преимущества данного способа заключаются в следующем:

- возможность использования металлов, выпускаемых промышленностью в виде фольги определенного состава и стандартной толщины;
- возможность изготовления и поставок по кооперации специального фольгированного материала в виде листов, которые можно разрезать и обработать обычными механическими способами;
- обеспечение высокой прочности сцепления фольги с диэлектриком за счет клеевого соединения;
- совмещение процесса изготовления изоляционной подложки для будущей печатной платы с процессом ее металлизации;
- отсутствие химических воздействий на материал подложки в процессе металлизации.

Развитие этого способа металлизации привело к созданию целой отрасли промышленности по производству фольгированных диэлектриков, применение которых вышло за пределы области собственно печатных плат. В настоящее время для их изготовления применяют фольгу из меди, никеля, алюминия, нихрома и других металлов. Фольгу наклеивают на полимерные пленки, слоистые материалы типа гетинакса, текстолита и стеклотекстолита и т.д.

### **5.4.3. Формирование рисунка проводников**

Процессы создания рисунка из токопроводящего или защитного покрытия в форме, определенной конструкторским чертежом, или процессы печати, используемые в технологии изготовления печатных плат, заимствованы в основном из области полиграфической техники и развивались в соответствии с требованиями, предъявляемыми к геометрическим характеристикам печатных проводников. Применение того или иного процесса печати является характерным признаком способа изготовления печатных плат, в связи с чем в запатентованных способах изготовления печатных плат были поданы заявки практически на все известные процессы печати. Однако лишь некоторые из них получили применение в промышленной практике. Основные требования, предъявляемые к процессу печати, следующие:

- совместимость процесса печати с процессом металлизации;
- высокая разрешающая способность;
- минимальная трудоемкость;
- печать на площади больших размеров;
- возможность механизации и автоматизации.

Способ офсетной печати применялся на первых этапах освоения техники печатных плат. Процесс заключается в переносе краски с формы, имеющей определенный рисунок, на поверхность подложки с помощью цилиндра покрытого эластичной резиной. Применение способа было обусловлено наличием в полиграфическом машиностроении налаженного производства плоскочечатных машин, применение которых позволяло без особого труда наладить изготовление печатных плат. Однако недостаточная толщина наносимого слоя краски и ее свойства не обеспечивают достаточных защитных свойств, а дополнительные операции по припудриванию канифолью и тальком с последующим оплавлением снижают и без того невысокую разрешающую способность процесса. Тем не менее способ используется

на некоторых предприятиях до настоящего времени. С его помощью удобно проводить маркировку печатных плат.

Печать через трафарет (шелкография и сеткография) получила широкое распространение в технике печатных плат для нанесения защитных рисунков, так как позволяет применять самые разнообразные краски и составы на основе полимерных смол с высокими защитными свойствами. За долгие годы развития этого процесса создано высокопроизводительное оборудование, позволяющее автоматизировать процесс печати. До мелочей отработаны технологические операции, созданы специальные материалы для изготовления трафаретов большой площади. Трафарет представляет собой металлическую или шелковую сетку с мелкой ячейкой, на которой с помощью специального состава закрываются места свободные от проводников ("пробельные"). Трафарет помещается в специальную рамку, накладывается на заготовку и с помощью ракеля (плоской пластины) кислотоупорная краска продавливается сквозь незакрытые ячейки сетки на поверхность заготовки, формируя требуемый рисунок проводников, затем трафарет переносится на следующую заготовку и процесс повторяется. Таким способом удается получать проводники шириной не менее, 1-0,2 мм с разрешающей способностью 0-50 мкм.

Более высокой разрешающей способностью обладает способ фотохимической печати (фотолитографии), использующий специальные фоточувствительные материалы, наносимые на поверхность заготовки. Для получения рисунка светочувствительный слой экспонируется (засвечивается) через специальный пленочный или стеклянный шаблон, изготовленный фотографическим путем и несущий рисунок проводников. Таким образом удается формировать необходимое защитное покрытие для проводников шириной менее ,1 мм с разрешающей способностью 0-20 мкм. Несмотря на более высокую трудоемкость и необходимость использования специального оборудования и специфических технологических операций способ фотохимической печати находит наибольшее применение при производстве печатных плат.

Из других известных способов печати рисунка для изготовления печатных плат патентовались способы электрографии (ксерокопирования), декалькомании, различные способы тиснения, прессования, групповой штамповки, ручного и автоматического гравирования и фрезерования. Все эти и другие способы, обладая теми или иными достоинствами в конкретном случае их применения, не выдерживают сравнения по разрешающей способности и трудоемкости процесса с печатью через трафарет и фотохимической печатью.

### **5.5. Литература по теме**

Многослойный печатный монтаж в приборостроении, автоматике и вычислительной технике/ Под ред. А.Т. Белевцева. -М.: Машиностроение, 978. -64 с.

### **5.6. Вопросы для самопроверки**

- 1. Какое место занимают электрические соединения в РЭС?*
- 2. Назовите и охарактеризуйте основные способы осуществления электрических соединений?*
- 3. Что такое печатная схема? Назовите ее отличительные особенности.*
- 4. Что такое печатная плата и какие технологические операции используются при ее изготовлении?*
- 5. Как изготавливаются компоненты печатных плат?*

## **ЛЕКЦИЯ 6. КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

***Введение:** Связь конструкции печатной платы и технологии ее изготовления.*

***Общие вопросы конструирования печатных плат:** Координатная сетка. Поверхностный монтаж.*

***Виды печатных плат и их характеристики:** Классификация плат. Односторонние ПП Двухсторонние ПП. Многослойные ПП. Гибкие ПП. Проводные платы.*

***Современные методы изготовления печатных плат:** Классификация. Субтрактивные методы: химический, комбинированный позитивный, комбинированный негативный Аддитивные методы.*

***Печатно-проводной монтаж:** Стежковый монтаж. Монтаж с фиксацией и без фиксации проводов.*

### **6.1. Введение**

Конструирование печатных плат (ПП) и технология их изготовления настолько сильно связаны друг с другом, что раздельное рассмотрение этих вопросов не представляется возможным. Размещая компоненты схемы или элементы проводящего рисунка на поверхности основания печатной платы, выбирая конфигурацию и размеры печатных проводников и контактных площадок, конструктор всегда имеет в виду возможности и ограничения того технологического процесса, который будет использован при производстве печатной платы и печатного узла. Многочисленные рекомендации и наставления, приведенные в нормативно-технических документах по конструированию ПП, не досужая придумка чиновника от радиоэлектроники, а отражение реальных возможностей современного производства.

### **6.2. Общие вопросы конструирования печатных плат**

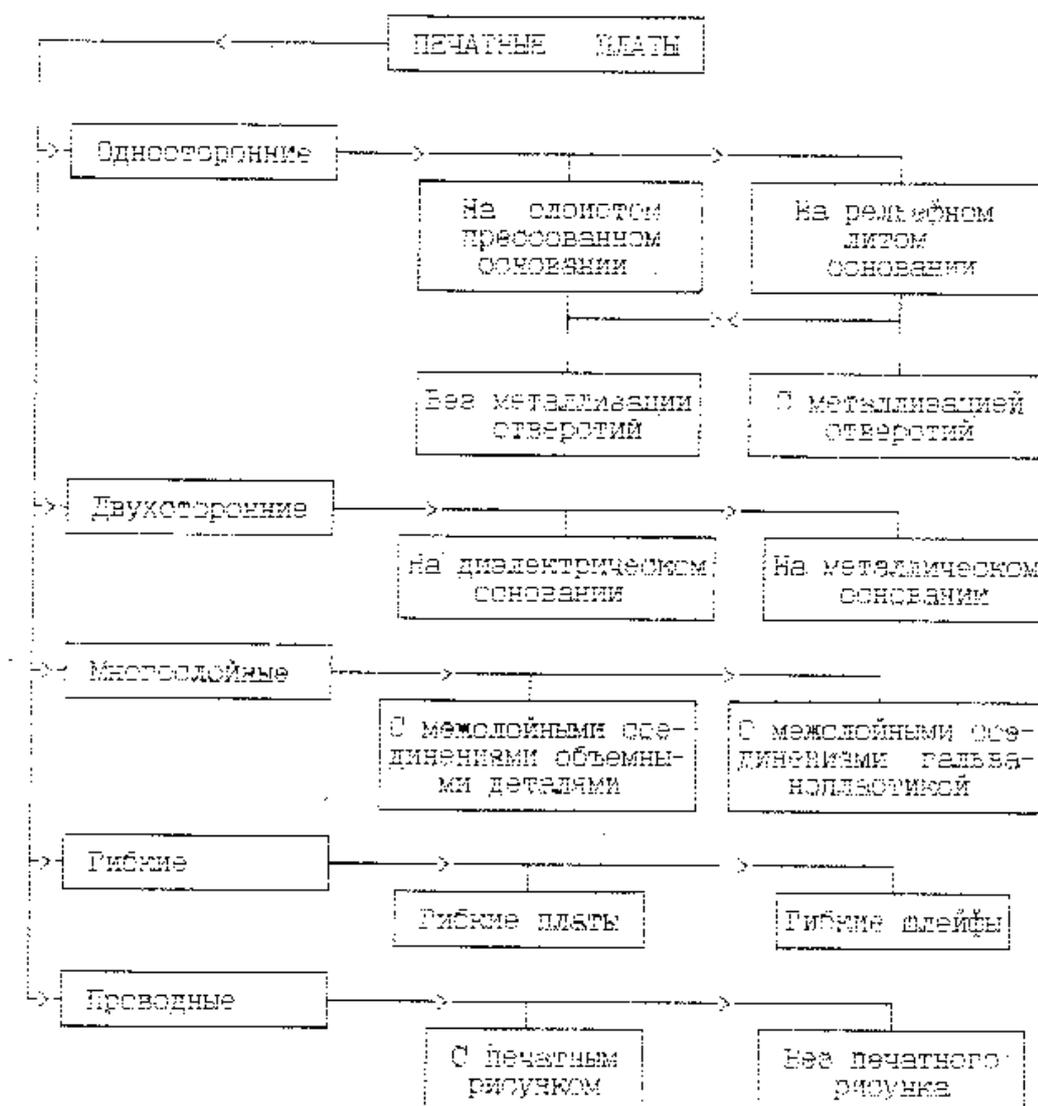


Рис. 6.1. Классификация печатных плат

Достаточно подробно основные моменты конструирования печатных плат рассмотрены в методических указаниях /1/. Здесь же отметим лишь один основополагающий аспект конструирования ПП.

С целью упрощения технологического оборудования с самого начала использования печатных плат было принято соглашение о том, что расстояния между выводами устанавливаемых элементов должны быть кратны 2,5 мм. Поэтому при конструировании ПП используется специальная координатная сетка из горизонтальных и вертикальных линий с шагом 2,5 мм, в узлах которой конструктор стремится располагать центры монтажных (куда вставляются выводы элементов) и крепежных отверстий. Печатные проводники также стараются проводить вдоль линий этой сетки. В дальнейшем в связи с постепенным переходом от монтажа в отверстия к монтажу на поверхность печатной платы (когда для закрепления вывода элемента в плате уже не сверлится монтажное отверстие, а формируется лишь плоская контактная площадка) появилось оборудование и элементы, использующие шаг 1,25 и 0,625 мм. Очевидно, что уменьшение шага сетки требует перехода на новый более дорогостоящий вид технологического оборудования и разработки новых конструкций компонентов схемы. Но, по-видимому, переход к монтажу на поверхность является магистральным направлением развития современных РЭС.

### 6.3. Виды печатных плат и их характеристики

Процесс конструирования печатной платы, как указано в /1/, начинается с выбора вида ПП. Конструктивно-технологические разновидности печатных плат (ПП), используемые в современном производстве, представлены на рис. 6.1. В зависимости от числа нанесенных проводящих слоев ПП разделяют на одно-, двухсторонние и многослойные.

Односторонние печатные платы выполняются на листовом слоистом или рельефном литом основании без металлизации или с металлизацией монтажных отверстий. Общим недостатком плат без металлизации отверстия является частое отслаивание и обрывы проводников в местах закрепления выводов компонентов. Платы на слоистом диэлектрике просты по конструкции и экономичны в изготовлении. Их применяют для монтажа бытовой аппаратуры, блоков питания и устройств техники связи. Низкие затраты, высокую технологичность и нагревостойкость имеют рельефные (трехмерные) литые ПП, на одной стороне которых расположены элементы печатного монтажа, а на другой – объемные элементы (корпуса соединителей, периферийная аппаратура для крепления деталей и ЭРЭ, теплоотводы и т.д.). В этих платах за один технологический цикл получается вся конструкция с монтажными отверстиями и специальными углублениями для расположения ЭРЭ, монтируемых на поверхность. В настоящее время технология рельефных ПП интенсивно развивается.

Двухсторонние печатные платы (ДПП) имеют проводящий рисунок на обеих сторонах диэлектрического или металлического оснований. Электрическая связь слоев печатного монтажа осуществляется с помощью металлизации отверстий. Двухсторонние печатные платы обладают повышенной плотностью монтажа и надежностью соединений. Они используются в измерительной технике, системах управления и автоматического регулирования. Использование металлических оснований позволяет решить проблему теплоотвода в высокоточной и радиопередающей аппаратуре.

Многослойные печатные платы (МПП) состоят из чередующихся слоев изоляционного материала и проводящего рисунка, соединенных клеевыми прокладками в монолитную листовую структуру путем прессования. Электрическая связь между проводящими слоями выполняется специальными объемными деталями, печатными элементами или химико-гальванической металлизацией. Платы характеризуются высокой плотностью монтажа, надежностью, устойчивостью к климатическим и механическим воздействиям. Однако большая трудоемкость изготовления, высокая точность рисунка и совмещения отдельных слоев, необходимость тщательного контроля на всех операциях, низкая ремонтопригодность, сложность технологического оборудования и высокая стоимость позволяют применять МПП для тщательно отработанных конструкций электронно-вычислительной, авиационной и космической аппаратуры.

Гибкие печатные платы (ГПП) конструктивно оформлены также как ОПП или ДПП, но выполняются на эластичном основании толщиной 1...0,5 мм. Они применяются в тех случаях, когда плата в процессе эксплуатации подвергается вибрациям, многократным изгибам или ей после установки ЭРЭ необходимо придать компактную изогнутую форму. Разновидностью ГПП являются гибкие печатные кабели (ГПК), которые состоят из одного или нескольких непроводящих слоев с размещенными печатными проводниками. Толщина ГПК колеблется от 0,06 до 0,3 мм. Они широко применяются для межсоединений узлов и блоков РЭС, так как занимают меньшие объемы и легче круглых жгутов и кабелей, а их производство может осуществляться непрерывно на рулонном материале.

Проводные печатные платы представляют собой диэлектрическое основание, на котором выполняется печатный монтаж или отдельные его элементы (контактные площадки, шины питания и заземления), а необходимы электрические соединения проводят изолированными проводами диаметром 0,1...0,2 мм. Эти платы нашли применение на этапах макетирования, разработки опытных образцов, в условиях мелкосерийного выпуска, когда

производство МПП неэкономично. Трехслойная проводная плата эквивалентна по монтажу 8...11-слойной МПП. При этом сокращается количество необходимой технологической оснастки и применяемых операций. Разработано специальное технологическое оборудование (типа станков с ЧПУ), которое позволяет осуществлять автоматизированное соединения проводниками по заранее заданной программе.

#### 6.4. Современные методы изготовления печатных плат

Современные методы изготовления ПП принято разделять на

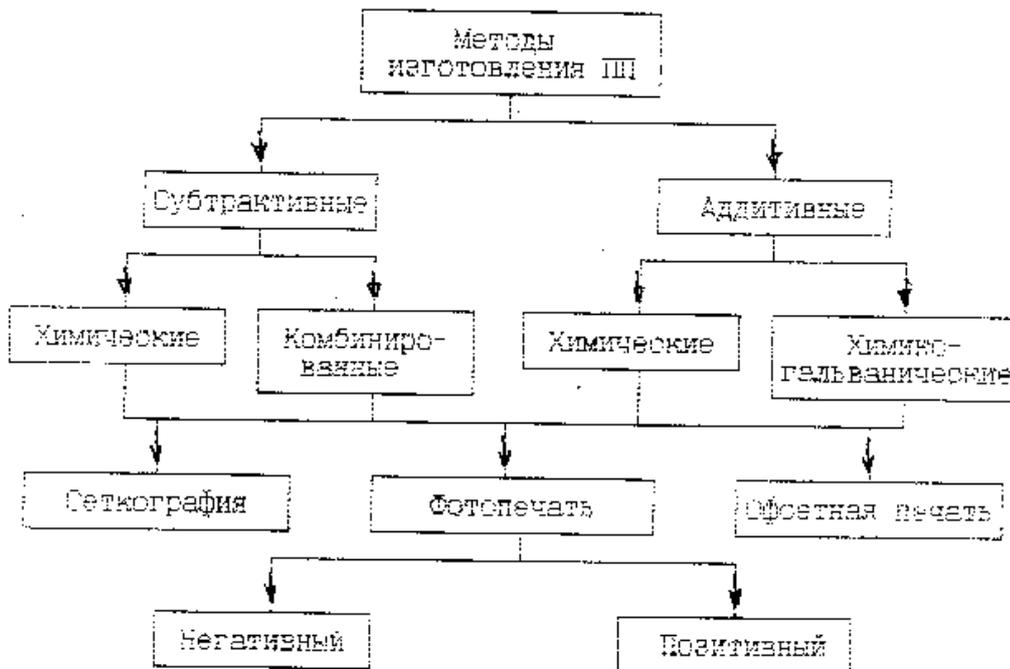


Рис. 5.2. Классификация методов изготовления печатных плат

25

две группы: аддитивные и субтрактивные (рис. 6.2).

#### 6.4.1. Субтрактивные методы изготовления

В субтрактивных методах в качестве основания для печатного монтажа используют фольгированные диэлектрики, и проводящий рисунок формируется путем удаления фольги с непроводящих (пробельных) участков. Разрешающая способность (0,2-0,3 мм) определяется подтравливанием проводников при удалении пробельных мест и увеличивается с уменьшением толщины медной фольги.

Субтрактивный химический способ используется при изготовлении односторонних печатных плат и включает следующие основные технологические операции:

- вырезание из листа фольгированного диэлектрика заготовки печатной платы заданных размеров и конфигурации; - сверление на станках с ЧПУ монтажных отверстий в заготовке; - защита будущих проводников и контактных площадок материалом, стойким к действию травителей меди (краска, фоторезист). Используется сеткография, фотолитография или офсетная печать; - стравливание пробельных мест, не защищенных на предыдущем этапе, в специальных растворах (используется, например, водный раствор хлорного железа или хлорной меди с необходимыми добавками); - удаление защитного рисунка и маркировка платы.

Для изготовления двухсторонних печатных плат с химико-гальванической металлизацией отверстий используются комбинированные методы - позитивный и негативный.

Комбинированный позитивный способ включает следующие технологические операции:

- получение заготовки из листа диэлектрика фольгированного с двух сторон, сверление и очистка отверстий; - химическое меднение (осаждение тонкого слоя меди из раствора ее соли) поверхности печатной платы и монтажных отверстий; - нанесение методами фотолитографии, сеткографии или офсетной печати защитного рисунка на пробельные (обратите внимание !) места; - наращивание слоя меди на поверхности проводников и в монтажных отверстиях в гальванических ваннах (осаждение меди под действием электрического тока); - нанесение гальваническим способом защитного слоя металла, стойкого к действию травителей меди на проводники и в монтажные отверстия (в частности, может использоваться олово); - удаление защитного рисунка с пробельных мест и травление меди; - промывка, контроль и маркировка платы.

Особенностью (и недостатком !!) позитивного метода является гальваническое нанесение на проводники и в монтажные отверстия защитного металлического слоя. Это непростая технологическая операция, во время которой заготовка подвергается длительному воздействию агрессивной химической среды, ухудшающей ее диэлектрические свойства.

В комбинированном негативном методе эта операция не используется и последовательность действий следующая:

- получение двухсторонней заготовки и сверление отверстий; - нанесение защитного рисунка на проводники и контактные площадки и травление меди с пробельных мест; - химическое меднение отверстий; - гальваническое наращивание слоя меди в отверстиях и на проводниках; - промывка, контроль и маркировка печатных плат.

Для гальванического осаждения меди необходимо, чтобы проводящий рисунок на плате составлял единую электрическую цепь. В комбинированном негативном способе для этого используются технологические переемы или специальные контактные устройства. Поэтому его разрешающая способность несколько ниже, чем у позитивного способа.

## 6.4.2. Аддитивные методы изготовления

Аддитивные методы основаны на избирательном осаждении токопроводящего покрытия на диэлектрическое основание. По сравнению с субтрактивными они обладают следующими преимуществами:

- однородностью структуры, так как проводники и металлизация отверстий получаются в едином химико-гальваническом процессе;
- устраняют подтравливание элементов печатного монтажа;
- улучшают равномерность толщины металлизированного слоя в отверстиях;
- повышают плотность печатного монтажа (ширина проводников составляет 0,13...0,15 мм);
- упрощают технологический процесс, исключая ряд операций (нанесение защитного покрытия, травление) и делают его более экологически чистым;
- экономят медь, химикаты для травления и затраты на нейтрализацию сточных вод;
- уменьшают длительность производственного цикла.

По способу создания токопроводящего покрытия аддитивные методы разделяются на химические и химико-гальванические. При химическом процессе на каталитически активных участках поверхности диэлектрического основания происходит химическое восстановление ионов металла. В разработанных растворах скорость увеличения толщины покрытия составляет 4 мкм/ч и для достижения необходимой величины 20-25 мкм требуется значительное время. В химико-гальваническом методе химическим способом получают лишь сравнительно тонкий проводящий слой металла (1-5 мкм), который затем избирательно усиливают более производительным электролитическим осаждением. Предварительная химическая металлизация при этом должна обеспечивать электрическое соединение всех элементов печатного монтажа.

Несмотря на указанные значительные преимущества, применение аддитивных методов в массовом производстве ПП ограничено низкой производительностью, интенсивным воздействием электролитов на диэлектрик, трудностью получения металлических покрытий с хорошей адгезией. В настоящее время доминирующей является все же субтрактивная технология, особенно с переходом на фольгированные диэлектрики с тонкой фольгой (5 и 8 мкм вместо 35 и 50 мкм).

## 6.5. Печатно-проводные платы

Для реализации электрических соединений в пределах платы наряду с печатным монтажом широко используют монтаж объемными проводами в изоляции. В ряде случаев такой монтаж экономичнее, чем с помощью обычной печатной платы (например, если плата большая с высокой плотностью компоновки, а монтаж проводом выполняется автоматизированным методом). Электрические соединения проводом позволяют вносить изменения и облегчают ремонт, повышают плотность компоновки из-за многократного перекрещивания проводов на одной поверхности, упрощают процесс трассировки, минимизируют длину соединений, уменьшают перекрестные помехи, сокращают сроки проектирования и изготовления, уменьшают количество требуемой технологической оснастки (фотооригиналов, фотошаблонов и др.), но затрудняют воспроизводимость параметров электрических связей (волнового сопротивления, паразитных параметров). Широкие технические возможности проводного монтажа, его экономичность в условиях мелкосерийного производства привели к разработке программируемого автоматического оборудования и многочисленных технологических вариантов реализаций: стежковый, многопроводный с фиксированием проводов, незакрепленными проводами.

Стежковый монтаж представляет собой процесс трассировки электрических цепей по кратчайшим расстояниям на поверхности двухсторонней печатной платы, имеющей контактные площадки и монтажные отверстия, при помощи изолированных монтажных проводов, которые образуют в монтажных отверстиях петли, подпаиваемые к контактным площадкам. Монтажная плата при этом изготавливается по типовой технологии, но ее

основными элементами являются не проводники, а контактные площадки для подсоединения планарных выводов ИС, ЭРЭ, соединителей, монтажные отверстия под петли и контактные площадки для распайки петель. В качестве диэлектрического основания применяют стеклотекстолит с толстым медным слоем (СФ-2Н-50), что позволяет улучшить теплоотвод и исключить отслаивание контактных площадок при пайке на них петель. Монтаж ведут изолированными проводами (например, марки ПЭВТКЛ) диаметром 0,08...0,2 мм.

Изготавливаемая монтажная плата собирается в специальном приспособлении в пакет, который состоит из нескольких слоев кабельной бумаги, эластичной резины и листа плотной резины. Трассировка и прошивка платы осуществляется пустотелой иглой, с расположенным внутри монтажным проводом. Игла проходит сквозь монтажное отверстие в плате и прокалывает слои эластичной резины, которые задерживают провод при обратном ходе иглы. Так образуются монтажные петли. Для укладки провода используют ручные прошивочные карандаши или станки с ЧПУ. После окончания прошивки со стороны проводов на плату накладывается металлическая пластина со слоем губчатой резины для поджатия проводов. С монтажного приспособления последовательно снимаются слои твердой и эластичной резины. Оставшиеся слои кабельной бумаги защищают плату при лужении проволочных петель и удаляются после выполнения этой операции. Лужение петель проводят вручную паяльником или погружением в ванну с припоем. Подгибка и пайка петель также проводится вручную или на станках с ЧПУ. Несмотря на то, что отдельные операции стежкового монтажа автоматизированы, производительность и эффективность всего процесса невелика.

Многопроводный монтаж с фиксированием основан на прокладывании изолированных проводов по поверхности ПП, на которую нанесен адгезионный слой, фиксировании в этом слое и соединении с проводящими элементами платы.

При монтаже незакрепленными проводами проложенные проводники сразу же соединяются с контактными площадками ПП пайкой или сваркой. Сварка обеспечивает более надежное соединение элементов в условиях вибрационных и ударных нагрузок.

## 6.6. Литература по теме

1. Блохин С.В., Лопаткин А.В., Петров В.В. Конструирование печатных узлов: Методические указания к лабораторной работе N1 по дисциплине "Основы конструирования и технологии РЭС". -Н. Новгород, НГТУ, 1993. -21 с.

2. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры: Уч. для вузов/Под ред. А.П. Достанко и Ш.М. Чабдарова.-М.: Радио и связь, 1989. -624 с.

## 6.7. Вопросы для самопроверки

1. Назовите и охарактеризуйте основные виды печатных плат.
2. Укажите основные отличия между аддитивными и субтрактивными методами изготовления. Какие способы имеют большую разрешающую способность, а какие меньшую трудоемкость?
3. Перечислите основные субтрактивные методы. Какие технологические операции входят в их состав?
4. Как выполняется стежковый монтаж?
5. Как выполняется монтаж с фиксацией проводов? Без фиксации?

## **ЛЕКЦИЯ 7-9. P-CAD - САПР ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

***Введение:** Возможности системы проектирования P-CAD при проектировании печатных плат. Требования к аппаратному обеспечению. Установка пакета на ЭВМ.*

***Последовательность разработки печатных плат в P-CAD:** Работа с редактором PC-CAPS. Извлечение логических связей и проверка схемы. Создание заготовки печатной платы. Редактирование файла перекрестных ссылок. Создание упакованной базы данных. Размещение элементов на плате. Трассировка проводников. Доработка проекта.*

### **7.1. Введение**

Система проектирования радиоэлектронной аппаратуры P-CAD, разработанная фирмой ALTIUM (An IBM Company), на сегодняшний день является одной из самых мощных, полных и последовательных систем автоматизированного проектирования для персональных компьютеров. P-CAD представляет собой пакет специализированных программ, связанных друг с другом и охватывающих практически все этапы разработки и изготовления печатных плат. Он позволяет эффективно создавать принципиальные электрические схемы (ПС), полузаказные ИС, программируемые логические матрицы (ПЛМ), проводить моделирование цифровых логических схем, но все же основное его назначение - конструирование печатных плат (ПП).

Программные средства системы позволяют автоматизировать весь процесс проектирования ПП, начиная с создания ПС, через автоматическое или интерактивное размещение радиоэлектронных компонентов (РЭК) на ПП и автотрассировку соединений, до получения конструкторской документации и подготовки информации для производства плат на технологическом оборудовании.

Наибольшую известность и самое широкое распространение получила версия 4.50 системы, разработанная в конце 1989 года. Она продолжает активно использоваться разработчиками, хотя к настоящему времени выпущена уже версия 8.5 для DOS и версия ECCEL EDA для Windows. Версия 4.50 русифицирована, для нее создана обширная графическая библиотека и написаны драйверы для сопряжения с используемым в нашей стране технологическим оборудованием.

Как показал опыт работы с различными версиями, последующие изменения пакета, не изменяли идеологии проектирования и касались в основном диалога с пользователем и некоторых характеристик системы, но при этом существенно ужесточили требования к аппаратному обеспечению. По-видимому, здесь работает известный принцип "программа продает компьютер" - фирма IBM тем самым побуждает пользователей к приобретению новых моделей компьютеров. С этой точки зрения полезно познакомиться с историей развития пакета.

*Версия P-CAD 5.0* (январь 1992 г.). За счет изменения организации работы с расширенной памятью увеличен максимальный размер проекта. В редакторе печатных плат введен текущий контроль технологических ограничений при ручной трассировке платы. Основное новшество - включение в автоматический трассировщик команд ручного редактирования. Однако этот опыт оказался неудачным и распространение версий пятого поколения было прекращено.

*Версия P-CAD 6.0* (июль 1992 г.). Ориентирована на машины с процессорами не ниже 80386, мониторами не хуже VGA, ОЗУ не менее 4 Мб. За счет перехода к арифметике с плавающей запятой на два порядка повышена разрешающая способность графических редакторов и практически сняты ограничения на сложность проекта. Основное достоинство - повышение качества трассировки печатных плат за счет устранения ошибок в алгоритме оптимизации P-CAD 4.50. Кроме того, введен ряд полезных дополнений, касающихся диалога с пользователем.

*Версия P-CAD 6.02* (октябрь 1992 г.). Исправлены мелкие ошибки в некоторых графических редакторах.

*Версия P-CAD 6.07* (июнь 1993 г.). Наибольшие изменения внесены в программу автоматической трассировки, что позволило на 30-40 % увеличить скорость и улучшить качество трассировки.

*Версия P-CAD 7.0* (октябрь 1993 г.). Основные изменения внесены в интерфейс системы: неисчезающие выпадающие меню; “горячие” клавиши; кратковременный выход в DOS из всех приложений; шаблоны баз данных для первоначальной установки; повышенная скорость вычерчивания экрана и т.д.

*Версия P-CAD 8.0* (сентябрь 1994 г.). Предусмотрена возможность установки P-CAD под управлением WINDOWS (сам пакет по-прежнему работает под DOS) и сделано более 70 изменений, касающихся, использования средств Windows, а также повышения качества трассировки и удобства работы с системой.

*Версия P-CAD 8.5* (октябрь 1995 г.). Система работает под DOS, но поставляется не только на дискетах, но и на оптических дисках. Внесены небольшие изменения в интерфейс системы.

29 февраля 1996 года фирма ACCEL Technologies организовала презентацию давно ожидаемой версии системы разработки печатных плат для Windows. Одновременно со сменой владельца фирмы она получила новое название *ACCEL EDA, версия 12.0*. Однако ветвь P-CAD для DOS продолжает развиваться и летом 1996 года был запланирован выпуск следующей версии P-CAD 8.6.

Пользователь, знакомый с P-CAD 4.50, может очень быстро освоить все последующие версии, поскольку, как видно из этого краткого обзора, принципиальной разницы между ними нет. Учитывая это, далее остановимся на подробном рассмотрении версии 4.50, указывая при необходимости отличия более поздних вариантов.

## **7.2. Возможности системы P-CAD при проектировании ПП**

В P-CAD 4.50 каждая спроектированная ПП (односторонняя или многослойная) может включать до 500 компонентов с общим числом выводов до 6000 и связанных 1000 электрических цепей. Размер проектируемой печатной платы может достигать 1.5x1.5 м при разрешающей способности ширины проводников и зазоров - 0.01 мм. Число проводниковых слоев печатной платы варьируется от 1 до 50.

В версии 8.5 печатная плата может содержать до 32000 компонентов с общим числом выводов до 250000. Максимальное число электрических цепей составляет 64000, а максимальный размер платы достигает фантастических цифр 14,8x20 м. На два порядка увеличена разрешающая способность - она составляет 0.0001 мм, а максимальное число слоев уменьшено до 32.

## **7.3. Требования к аппаратному обеспечению**

Версия 4.50 P-CAD работает в среде MS-DOS на IBM PC/XT/AT, а также на любых IBM-совместимых ПК. Минимально требуемая конфигурация:

- 640 Кб оперативной памяти;
- 10 Мб дисковой памяти (винчестер) или разделяемый диск в сети ЭВМ (для полного комплекта);
- НГМД емкостью 360 Кб и более;
- поддерживается любой тип монитора;
- устройство ввода - клавиатура, но удобнее использовать манипулятор “мышь”;
- устройства вывода - печать, плоттер/фотоплоттер (драйверы поддерживают более 30 типов различных устройств);
- сопроцессор не используется.

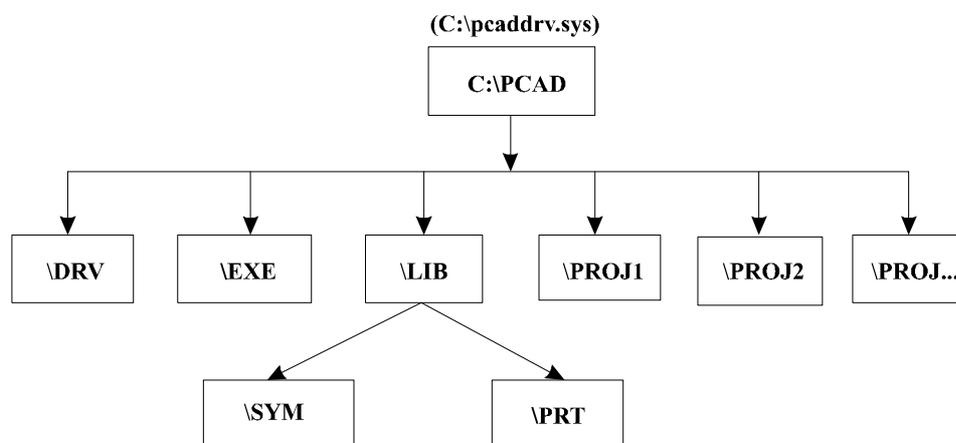
Версия 8.5 может быть установлена на ПК с процессором 80386 и старше, с объемом ОЗУ не менее 4 МБ. Свободное пространство на жестком диске должно составлять не менее 60 МБ, в то время как сама система занимает 28 МБ (без библиотек). Обязателен манипулятор “мышь” и монитор не хуже VGA. Активно используется сопроцессор.

#### 7.4. Размещение пакета на жестком диске

Для эффективной работы с системой пользователю необходимо знать местоположение отдельных файлов системы на жестком диске. Наиболее часто используемая структура директорий P-CAD приведена на рис. 1. В корневом каталоге диска создается директория с именем “PCAD”. В ней размещаются служебные поддиректории: “DRV”-для хранения драйверов пакета; “EXE”-для исполняемых программ; “LIB”-для библиотек компонентов. Если диск один, здесь же можно создать рабочие поддиректории для рабочих проектов (“PROJ1”, “PROJ2”,...). Если диск разбит на несколько логических устройств, то, как правило, служебные и рабочие поддиректории размещаются на разных устройствах.

Для большой библиотеки в директории “LIB” могут создаваться отдельные поддиректории для хранения схемных и конструктивных образов элементов (“SYM” и “PRT”, соответственно). Однотипные компоненты в библиотеке объединяются в разделы, имеющие расширение “SLB” - для схемных образов элементов и “PLB” - для конструктивных.

В корневом каталоге диска, на котором расположены служебные файлы пакета, должен находиться текстовый файл **PCADDRV.SYS**, содержащий указания на используемые драйверы периферийных устройств.



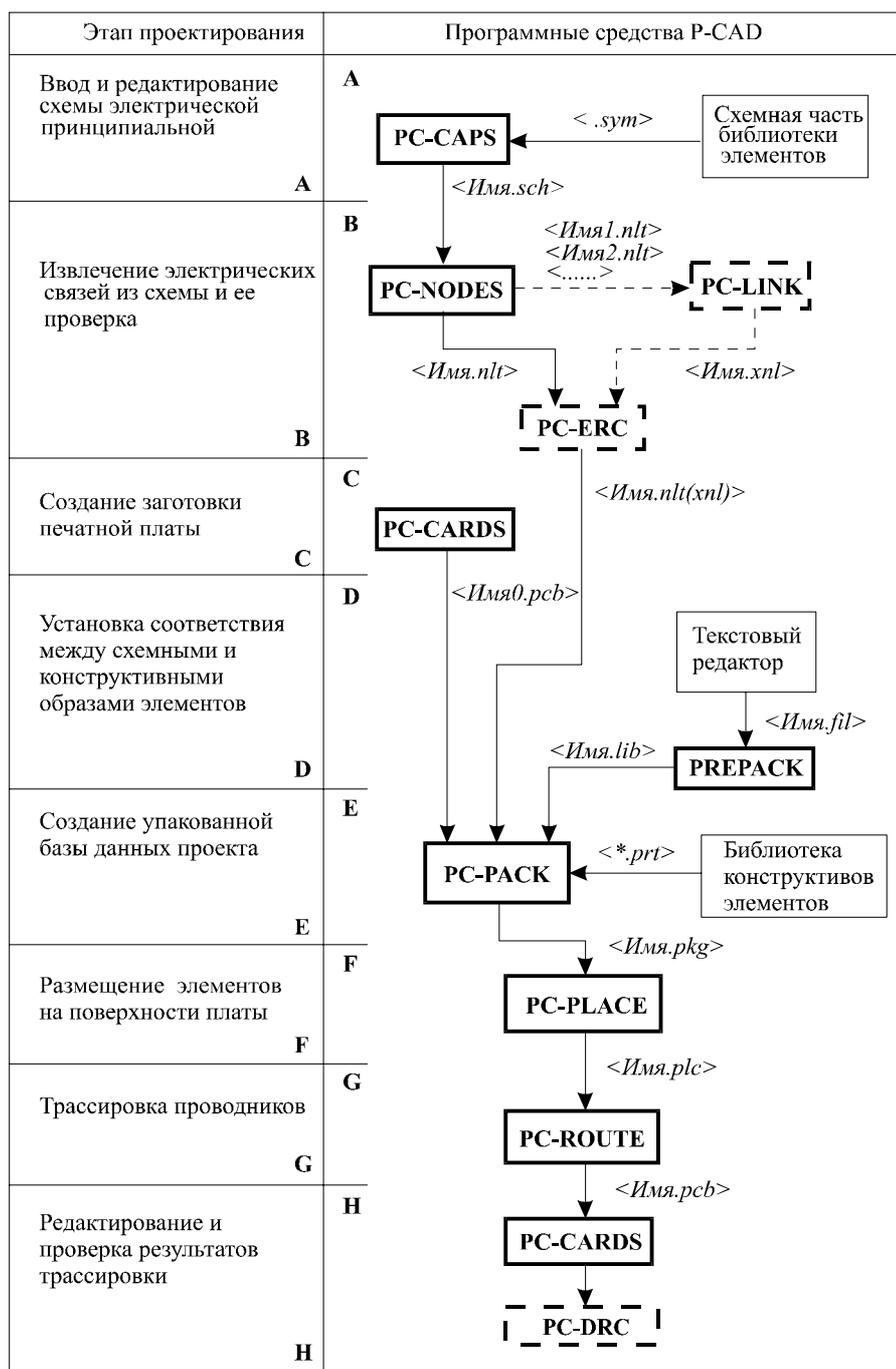
#### 7.5. Порядок проектирования печатных плат в системе P-CAD

Программы системы P-CAD дают разработчику широкие возможности организации процесса проектирования ПП. На рис. 2 представлен наиболее полный путь, использующий все основные программы. Для упрощения показаны только нисходящие связи между программами. Штриховыми линиями выделены вспомогательные программы и направления, которые могут отсутствовать в отдельных проектах.

Рассмотрим содержание основных этапов проектирования, обозначенных на рис. 2 большими латинскими буквами.

А) В начале разработки печатной платы с помощью графического редактора **PC-CAPS** в ПК вводится и редактируется электрическая принципиальная схема проектируемого печатного узла. При этом используется часть графической библиотеки системы, содержащая схемные образы компонентов. Введенная схема хранится в графическом файле базы данных <Имя>.SCH.

В) С помощью программы-утилиты **PC-NODES** из созданного файла схемы извлекается информация о используемых компонентах и электрических связях между ними.



Эта информация сохраняется в двоичном файле  $\langle \text{Имя} \rangle .NLT$ .

Если схема очень большая, ее можно вводить и сохранять частями (листами) в файлах  $\langle \text{Имя1} \rangle .SCH$ ,  $\langle \text{Имя2} \rangle .SCH$  и т.д. Каждый из этих файлов обрабатывается программой **PC-NODES**, а затем все выходные файлы объединяются программой **PC-LINK** в результирующий файл  $\langle \text{Имя} \rangle .XNL$ , имеющий такой же формат, как и файлы с расширением "NLT". На рис. 2 этот путь показан пунктиром.

Созданная схема проверяется на наличие ошибок ввода и редактирования с помощью программы **PC-ERC**.

С) Далее в графическом редакторе **PC-CARDS** создается заготовка печатной платы и указываются границы поля трассировки печатных проводников и размещения элементов. Размеры и конфигурация заготовки, наличие пазов, вырезов, отверстий для крепления, а

также вид и размещение границ полей для проводников и элементов определяются при этом *конструктивно-технологическими требованиями*.

Созданная заготовка сохраняется в файле *<Имя>.PCB*. Если планируется разработка нескольких плат одинаковых размеров и конфигурации, например ТЭЗов (типовых элементов замены), целесообразно для сохранения использовать файл *<Имя0>.PCB*.

**Д)** На следующем этапе проводится коррекция текстового *файла перекрестных ссылок*, имеющего расширение “*FIL*” и расположенного, как правило, в директории библиотеки. В этом файле устанавливается соответствие между схемной и конструктивной частями библиотеки элементов. Он может создаваться для отдельной схемы или для всей библиотеки сразу. Необходимость коррекции этого файла обусловлена тем, что какому то схемному элементу в разных проектах могут соответствовать разные конструкции.

Исправленный текстовый файл *<Имя>.FIL* передается в программу **PREPACK**, которая преобразует его в двоичный вид и записывает в файл *<Имя>.LIB*.

**Е)** Файлы *<Имя>.NLT*, *<Имя0>.PCB*, *<Имя>.LIB* передаются в программу **PC-PACK**, которая переносит электрические соединения из схемы на конструктивные элементы печатной платы. Результат записывается в файл *конструктивной базы данных <ИМЯ>.PKG*. Этот графический файл содержит все компоненты схемы и заготовку печатной платы, расположенные в произвольном порядке

**Ф)** Компоновка элементов на печатной плате осуществляется в графическом редакторе **PC-PLACE**, который извлекает необходимую первоначальную информацию из файла *<Имя>.PKG*. Элементы на поверхности ПП расставляются в ручном или автоматическом режимах. Рекомендуется результаты размещения сохранять в файле *<Имя>.PLC*. *В данном случае расширение нужно указывать при записи файла на диск, так как по умолчанию входной и выходной файлы в графических редакторах имеют одинаковые имена.*

**Г)** Файл *<Имя>.PLC* содержит сведения о размещении компонентов и связи между ними необходимые для работы программы автоматической трассировки **PC-ROUTE**. Особенности проекта отражаются в файле стратегии трассировки, который создается в диалоговом режиме после запуска **PC-ROUTE**. Результаты трассировки по умолчанию запишутся в файл *<Имя>.PCB*.

**Н)** Окончательная доработка проекта (коррекция проводников, доразводка связей и др.) проводится вручную с помощью редактора **PC-CARDS** в соответствии с требованиями задания. Окончательный вариант топологии проверяется с помощью программы **PC-DRC** на наличие конструктивно-технологических ошибок и с помощью программы **PC-NLC** на соответствие соединений между элементами схемы и платы. Схема электрическая принципиальная приводится в соответствие с фактическими соединениями на печатной плате с помощью программы **PC-BACK**.

Специальные программы-утилиты позволяют подготовить информацию фотоплоттеру для изготовления фотошаблона ПП, станку с ЧПУ для сверления отверстий, а также системе AutoCAD для подготовки комплекта конструкторской документации.

## 7.6. Работа с редактором PC-CAPS

В состав пакета PCAD 4.50 входит три редактора для ввода и редактирования графической информации:

**PC-CAPS** - для ввода принципиальных электрических схем;

**PC-CARDS** - для создания и редактирования печатных плат;

**PC-PLACE** - для размещения элементов схемы на плате.

С точки зрения пользователя все редакторы устроены и управляются одинаково, хотя и работают с разными объектами. Для примера достаточно подробно рассмотрим работу с редактором принципиальных электрических схем **PC-CAPS**.

Запуск любой программы пакета PCAD 4.50 может проводиться или из специальной программы-оболочки, или из командной строки. Для запуска редактора PC-CAPS из командной строки необходимо на клавиатуре набрать

**pcscaps + [Enter]**

(в квадратных скобках будем указывать клавишу).

На экране появится титульный лист программы, а затем основное меню редактора. Выбор пунктов меню производится клавишей [пробел] или клавишами со стрелками. Для выполнения действия нажимается [Enter].

В начале работы, когда каталог текущего проекта еще не содержит никаких файлов, необходимо выбрать пункт **“Configure PC-CAPS”**. При этом на экране появится меню параметров редактора (рис. 4).

Верхнюю строку **“Database filename”** (имя базы данных) можно оставить без изменения или указать в ней имя *уже имеющегося файла* проекта.

Во второй строке **“Library filename”** через **“;”** следует указать имена библиотек схемных элементов, которые необходимо использовать. Если набрать на клавиатуре **<\*.slb>**, то будут использоваться все схемные разделы библиотеки, имеющие расширение **“slb”**.

В строке **“Directory path”** задается путь к директории, содержащей библиотеки схемных элементов. Например, **D:\PCAD\LIB**. Если используются библиотеки, хранящиеся в разных директориях, пути к ним задаются через **“;”** и [Enter].

Кроме этого в соответствующей строке меню параметров необходимо указать к какому порту (COM1 или COM2) подключен манипулятор **“Мышь”**. Остальные параметры можно оставить неизменными. *Пункты меню настройки, которые необходимо проконтролировать и возможно изменить на рис. 4 условно выделены курсивом.*

Для выхода из меню настройки нажимается клавиша [Esc], при этом система выдает запрос на сохранение сделанных установок. Необходимо ответить утвердительно (**“Yes”**).

При переходе к редактированию данных в основном меню (**“Edit database”**) на экране появляется рабочее поле и меню команд (рис. 5). Управление в редакторе PC-CAPS производится от клавиатуры и **“мыши”** (или только клавиатуры, что очень неудобно). Будем обозначать левую кнопку мыши как [But1] (она соответствует клавише [пробел]), а правую - как [But2] (клавиша [Esc]).

Рабочее поле на экране представляется в виде сетки, нанесенной точками. В правой части экрана - меню команд. Команды расположены в две колонки. Выбор команды осуществляется перемещением курсора, а выполнение нажатием кнопки [But1]. Перемещение курсора между рабочим полем и полем меню проводится с помощью **“мыши”** или клавиши [F10]. В поле меню курсор превращается в красную рамку, которая изменяет цвет при нажатии [But1]. В рабочем поле курсор представляет собой маленький крестик, который перемещается по узлам сетки. *Установить курсор между узлами сетки в обычном режиме нельзя!*

Разместив курсор между рамками, ограничивающими рабочее поле (при этом курсор увеличивается в размерах) и нажимая [But1], можно сдвигать рабочее поле относительно схемы в соответствующую сторону.

<b><u>PC-CAPS CONFIGURATION</u></b>	
<b>Database filename:</b>	AVL.SCH
<b>Library filename:</b>	*.slb
<b>Pfkey filename:</b>	None
<b>Directory path:</b>	
c:\pcad\lib;	
current	
<b>Security Device port .....</b>	<b>port 1</b>
<b>Mouse port .....</b>	<b>port 1</b>
<b>Video save to disk .....</b>	<b>Off</b>
<b>Automatic layer switching .....</b>	<b>On</b>
<b>Pin size .....</b>	<b>10</b>
<b>Solder dot size .....</b>	<b>10</b>
<b>Component scale (percent of original size).....</b>	<b>100</b>
<b>Component text scale (percent of original size).....</b>	<b>100</b>
<b>Rotate Component Text in Four Directions.....</b>	<b>Off</b>
<b>Pan Bars.....</b>	<b>On</b>

Нижняя строка на экране является статус-строкой. В ней устанавливаются параметры, определяющие активный слой, высоту шрифта для текста, ориентацию, тип линий, шаг сетки и т.д. Установка параметров осуществляется так же, как выбор и исполнение команд. Перемещение курсора между рабочим полем и статус-строкой осуществляется с помощью мыши или клавиши [F9].

Редакторы PC-CAPS и PC-CARDS могут работать в двух режимах: дополнительном - *режиме создания элементов библиотеки "SYMB"*, и основном - *режиме редактирования проекта "DETL"*. Цвет команд меню в режиме "DETL" зеленый, а в режиме "SYMB" - красный.

На пустом месте в левой колонке поле меню при выборе большинства основных команд появляются команды дополнительного меню, имеющие желтый цвет. В дальнейшем команды из дополнительного меню будут указываться после основных через "/" (слэш). Например, для соединения элементов схемы проводниками необходимо последовательно указать и запустить на выполнение команды "Enter" основного меню и команду "Wire" - дополнительного:

*ENTR/WIRE.*

Процесс проектирования принципиальных схем в графическом редакторе PC-CAPS можно представить в виде создания отдельных фрагментов рисунка схемы на нескольких прозрачных пленках (слоях), при наложении которых друг на друга получается необходимое изображение. Так на одном слое рисуется условное графическое обозначение элемента, на другом номера выводов, на третьем соединительные проводники между элементами и т.д. Каждый слой имеет свой цвет и может находиться в трех состояниях:

**OFF** - слой невидим и недоступен для редактирования;

**ON** - слой видим, но не редактируется;

**ABL** - слой видим и доступен для редактирования.

В каждый текущий момент времени редактор работает только с одним слоем, который предварительно был переведен в активное состояние. Активизация возможна для слоев в состоянии "ABL" и производится либо автоматически при выполнении соответствующей команды, либо вручную.

Посмотреть и изменить состояние слоев можно с помощью команды *VLIR*. При выборе этой команды на экране появляется экран слоев с указанием их состояния. Поместив курсор на соответствующий индикатор, кнопкой [But1] последовательно перебирают возможные варианты. Активный слой отмечается буквой "A" справа от указателя "ABL". Для примера в таблице 1 приведены основные слои, используемые в редакторе PC-CAPS и их назначение.

Ввод и редактирование электрической схемы в PC-CAPS производится в следующем порядке.

1) Перед началом ввода схемы следует установить метрическую систему единиц командой *SCMD/UNIT*.

***Система единиц может быть изменена только в пустой базе данных !!!***

2) Далее необходимо открыть каталог библиотеки, активизировав команды *ENTR/COMP* и нажав в ответ на запрос системы клавишу [F1]. Как правило, схемные элементы в библиотеке группируются по разделам, например: микросхемы КМОП, микросхемы ТТЛ, резисторы и конденсаторы и т.д. Для извлечения соответствующего элемента следует открыть нужный каталог, найти имя элемента и, выделив его курсором, нажать [But1]. После этого с помощью "мыши" фантом элемента (белый прямоугольник, ограничивающий контур элемента) располагается в нужном месте на рабочем поле и нажимается [But1]. Появится условное графическое обозначение элемента. Фантом перемещается на новое место, рисуется еще одно изображение и т.д. Разместив требуемое количество копий элемента на рабочем поле, следует нажать [But2] и вернуться в библиотеку за новым элементом.

При размещении элемента изменение его ориентации производится с помощью 4-х букв “F” в статус-строке, а зеркальная копия элемента получается изменением цвета буквы “M”. Для этого перед фиксацией белого прямоугольника следует опустить курсор в статус-строку, указать нужные индикаторы курсором, нажать на [But1] и вернуться в рабочее поле.

Корректировка расположения элементов на рабочем поле может быть проведена с помощью команд перемещения и вращения (*MOVE, ROT*), копирования (*COPY*) или удаления (*DEL*). Поэтому при извлечении элементов из библиотеки можно не стараться располагать их на каких то заранее определенных местах. *Элементы на рабочем поле в любой момент можно сдвинуть повернуть или размножить*. Единственное ограничение заключается в том, что зеркальную копию элемента можно получить только при извлечении его из библиотеки !

3) Для электрического соединения элементов друг с другом служит команда *ENTR/WIRE* или аналогичная ее *EDIT/WIRE*. После их активизации следует указать курсором темно-синий крестик на выводе элемента, который обозначает точку подключения, щелкнуть клавишей [But1] и, переместив курсор к новому выводу или уже существующей цепи, вновь щелкнуть [But1]. Если подключение проводника к выводу произошло, то темно-синий крестик исчезает, а в месте соединения проводников появляется точка. Редактирование формы и положения проводников удобно проводить с помощью команды *EDIT*.

**Если подключится к выводу элемента не удается, то следует максимально приблизить изображение контакта командой *ZIN* и указать такой шаг координатной сетки в статус-строке, при котором точка подключения располагается в узле сетки.**

4) Позиционные обозначения элементам в версии 4.50 следует назначать командой *SCMD/PNUM*, а имена цепям присваивать командой *NAME/NET*. *Нужно учитывать, что цепи имеющие одинаковые имена считаются соединенными, даже если в схеме на экране их явное соединение отсутствует*. Это свойство используется при создании схем с линиями групповой связи и многолистных электрических схем. Позиционные обозначения элементов, введенные командой *SCMD/PNUM*, относятся к числу атрибутов элемента, размещаются в слое REFDES и на поле экрана располагаются в местах отведенных для них при создании библиотечного образа элемента. Изменить их положение можно командой *MOVE/ATRB*.

5) Сохраняется отредактированная схема командой *FILE/SAVE*. Имя файла автоматически получает расширение <SCH>.

**При работе над схемой следует помнить, что редактируется информация только в слоях находящихся в состоянии “ABL”. Поэтому, если что-то не изменяется, не двигается, не появляется или наоборот исчезает при обновлении экрана, необходимо проверить состояние соответствующего слоя, используя команду *VLYR*, и, при необходимости, изменить его.**

Í àçááí èà	Öââö	Í àçí à-áí èà
GATE	Kòàní ù é	Kí í òóò yèàì áí òà
WIRES	Çäëáí ù é	Í òí áí áí èèè
BUS	Çäëáí ù é	Î àù èà ø èí ù
PINNUM	Çäëáí ù é	Í î ì àðà àù àí àí à
REFDES	Kòàní ù é	Í î çèòèí í í á í áí çí à-áí èà
NETNAM	Ñèí èé	Î áí çí à-áí èà öáí è
SDOT	Çäëáí ù é	Ñí ààèí áí èý ààóó î òí áí áí èèí à
DIVICE	Ãí èóáí é	Í àçááí èà yèàì áí òà
PINCON	Ñèí èé	Ö -èè í î àèèþ -áí èý è í òí áí áí èèàì
PINNAM	Ñèðáí ááù é	Í àèì áí í ààí èý àù àí àí à
PINFUN	Æèèòù é	Óóí èòèè àù àí àí à

## 7.7. Извлечение логических связей и проверка схемы

Созданный графический файл схемы удобен для пользователя, но содержит очень много ненужной для остальных программ пакета информации. Для дальнейшей работы по созданию печатной платы необходимо из созданного схемного файла <Имя.SCH> извлечь данные о используемых в схеме элементах и электрических связях между ними. Это преобразование схемного графического файла в двоичный файл связей проводится с помощью программы-утилиты **PC-NODES**. Вызывается программа командой

**pcnodes** + [Enter].

После запуска она запрашивает имя входного (схемного) и выходного (двоичного) файлов. Расширение при наборе имен можно не указывать. Выходной файл по умолчанию получит тоже имя с расширением <.NLT>.

Предварительная проверка схемы на наличие соединений между элементами проводится в редакторе **PC-CAPS** вручную командой *QRY*. Можно посмотреть:

- имя файла элемента и его позиционное обозначение (*QRY/COMP*);
- имя цепи и количество выводов, которые она объединяет (*QRY/NET*);
- тип вывода и имя цепи, к которой он подключен (*QRY/PIN*).

Автоматическая проверка схемы проводится с помощью программы-утилиты **PC-ERC**. Она позволяет обнаружить: плавающие выводы; цепи с одним соединением или без соединений; цепи без входных выводов элементов; цепи без выходных выводов элементов; выводов элементов; цепи с несколькими выходными выводами; цепи без нагрузочного резистора; элементы, у которых все входные выводы соединены вместе. В качестве исходного используется двоичный файл электрических связей и списка схемных компонентов с расширением <Имя.NLT>. Программа запускается командой

**pcerc** + [Enter].

Необходимые проверки выбираются в меню программы. По окончании ее работы формируется текстовый файл отчета с расширением <.ERC>. **Учтите, что программа PC-ERC предназначена в основном для проверки логических схем !**

## 7.7. Создание заготовки печатной платы

Заготовка печатной платы необходима для получения упакованной базы данных на одном из последующих этапов работы с пакетом. Для ее создания необходимо предварительно определить форму и размеры заготовки, наличие и расположение пазов, вырезов, крепежных отверстий и др. Уточнить места возможного расположения элементов и печатных проводников и места запрещенные для их размещения.

Ориентировочные размеры ПП могут быть определены путем аналитических компоновочных расчетов. Форма печатной платы и другие конструктивные параметры целиком определяются особенностями ее размещения в проектируемом устройстве. Особенности конструирования печатных узлов достаточно подробно рассмотрены в /5/.

Образ заготовки ПП создается в графическом редакторе печатных плат **PC-CARDS**. Порядок работы с этим редактором во многом идентичен работе со схемным редактором **PC-CAPS**. Точно также проводится настройка редактора на имеющиеся библиотеки, только вместо схемных разделов указываются конструктивные, имеющие расширение <.plb>.

После настройки редактора и выхода в режим редактирования базы данных (**режим "DETL" !**) следует:

- установить метрическую систему единиц (команда *SCMD/UNIT*);
- используя команду *VLYR*, перевести в состояние "ABL" слои *SLKSCR* (контур печатной платы) и *BRDOUT* (границы зон для размещения элементов и проводников). Остальные слои можно выключить;
- установив клавишей [F1] нужный слой в активное состояние, с помощью команд *DRAW (/LINE, /RECT)* нарисовать контур печатной платы и на ее поверхности задать

границы для размещения проводников и элементов. **Обратите внимание, что координаты курсора после установки метрической системы единиц в статус-строке указываются в миллиметрах !**

Чтобы в последующем не иметь проблем при ручной расстановке элементов при создании образа заготовки рекомендуется задать шаг координатной сетки 250:250 DBU.

Созданную заготовку рекомендуется сохранить в файле <Имя0.PCB> (команда FILE/SAVE). Расширение имени файла программа присвоит автоматически.

## 7.8. Редактирование файла перекрестных ссылок

Как уже отмечалось выше библиотека P-CAD состоит из двух частей: раздела схемных элементов и раздела конструктивных элементов. Эти части тесно увязаны друг с другом, и отсутствие любой из них не позволит выполнить проектирование печатной платы в полном объеме.

Взаимосвязь между этими разделами устанавливается с помощью специального текстового файла, который называется *файлом перекрестных ссылок* и имеет расширение <.FIL>. Этот файл состоит из совокупности строк, количество которых определяется количеством разнотипных элементов, имеющих в библиотеке. Строки имеют следующий формат:

Секции	Ключевое слово	Имя корпуса	Выводы	Имя символа.
--------	----------------	-------------	--------	--------------

Перечисленные параметры имеют следующее значение:

*Секции* - количество однотипных секций (гейтов) в корпусе;

*Имя корпуса* - полное имя файла корпуса элемента;

*Выводы* - подключение “земли” и питания (необязательный параметр);

*Имя символа* - полное имя файла схемного образа.

Пример фрагмента файла перекрестных ссылок приведен на рис. 6. Здесь “TEMPORARY” (временный) - ключевое слово. Пустые строки в файле, а также текст после знака “%” до конца строки программами последующей обработки игнорируются.

*Следует обратить внимание, что в первых двух строчках файла указывается путь к библиотекам и имена используемых в файле конструктивных разделов !!!*

Файл перекрестных ссылок создается и редактируется в любом текстовом редакторе. Как правило, подобный файл уже есть в библиотечном каталоге и его нужно лишь немного отредактировать, чтобы привести в соответствии с особенностями проекта. Необходимость редактирования связана с тем, что одному и тому же схемному изображению могут соответствовать разные конструктивные исполнения. Например, резисторы имеют разную мощность рассеяния. Естественно, что при этом конструктивные файлы этих элементов должны быть разными, хотя схемные изображения могут оставаться неизменными. Обратите внимание, что в примере на рис. 6 схемному обозначению резистора *r.sum* соответствует конструктив полуваттного резистора, хотя ранее ему ставился в соответствие резистор в четверть ватта (строчка после знака процент).

**Рекомендуется скопировать имеющийся файл перекрестных ссылок в текущий рабочий каталог, присвоить ему имя проекта, а затем уже редактировать.**

Для использования в последующих программах пакета текстовый файл перекрестных ссылок <Имя.fil>, преобразуется в двоичную форму (файл <Имя.LIB>) программой **PREPACK**.

### 7.9. Создание упакованной базы данных

Соединение подготовленных рассмотренных выше разнородных частей проекта в единую базу данных проводится специальной программой-утилитой **PC-PACK**. После ее запуска командой

**pcpack + [Enter]**

следует выбрать в основном меню пункт “Package database “ (упаковка данных) и в ответ на появляющиеся текстовые запросы указать имена требуемых файлов (без расширений) и других необходимых сведений в следующем порядке:

- файл электрических связей и компонентов <Имя.NLT> (выход из **PC-NODES**);
- текстовый файл перекрестных ссылок <Имя.FIL>.
- двоичный файл перекрестных ссылок <Имя.LIB> (выход из **PREPACK**);
- указание на место расположения библиотек (оставить без изменения, если путь к библиотекам указан в файле перекрестных ссылок);
- файл заготовки печатной платы <Имя0.PCB> (выход из **PC-CARDS**);
- атрибут конструктивной базы данных (оставить без изменения).

Далее программа запросит имена выходных файлов. *Не рекомендую без особой необходимости изменять предложенные системой имена.*

Если исходные данные содержат ошибки, выходные базы данных не создаются. Информация о найденных ошибках записывается в текстовый файл *pcpack.err*. Типичной ошибкой начинающих является неправильное указание путей или имен библиотек, а также попытки связать схемные элементы с отсутствующими в библиотеке конструктивами.

### 7.10. Размещение элементов на плате

Автоматическое или ручное размещение элементов на печатной плате проводится с помощью графического редактора **PC-PLACE**.

Графический редактор **PC-PLACE** отличается от редакторов **PC-CAPS** и **PC-CARDS** расширенным до 4-х пунктов основным меню, отсутствием режима “SYMB” и возможности редактирования связей между элементами, наличием специальных команд для перестановок элементов или секций и задания стратегии авторазмещения, а также индикаторами качества размещения.

При автоматическом размещении элементы располагаются в узлах специальных установочных решеток. Таких решеток может быть несколько. За каждой решеткой закрепляется определенная группа элементов. Одна из групп (микросхемы в DIP-корпусах, разъемы) считается главной.

Перед началом авторазмещения проводятся следующие операции:

- указываются границы областей, в которых размещение элементов запрещено [команда *BARR*, слой *BARTOP* (сверху), *BARBOT* (снизу), *BARPLC* (везде);
- фиксируются командой *FIX* те элементы, положение которых не должно меняться;
- командой *LATP* задаются параметры установочной решетки (слой *LATi*); шаг, положение на плате и размеры области действия;
- с данной решеткой связывается определенная группа элементов;
- командой *ASSC* указывается взаимное положение второстепенных компонентов относительно главных, а командой *CLR* минимально допустимые расстояния между элементами.

Запускается процесс автоматического размещения командой *PLCE*. При наличии в корпусах микросхем нескольких однотипных секций некоторого улучшения качества размещения можно добиться выполнив команду *IMPR*. Следует признать, что качество автоматического размещения оставляет желать лучшего.

При наличии некоторого опыта в конструировании значительно лучших результатов можно добиться при ручном размещении компонентов. Здесь **PC-PLACE** может оказать существенную помощь. В этом редакторе используется три типа индикаторов, позволяющих оценить качество размещения и сделать его более целенаправленным: гистограмма, коэффициент улучшения и силовой вектор. *Гистограмма* графически отображает количество электрических связей, проходящих через различные сечения платы. *Коэффициент улучшения* является относительной числовой характеристикой качества размещения. *Силовой вектор* показывает наилучшее с точки зрения программы место для размещения элемента в данной ситуации.

Включение и выключение индикаторов проводится с помощью команды *HIST* и букв “H” и “V” в статус-строке. При размещении вручную необходимо стремиться к увеличению

коэффициента улучшения и к тому, чтобы цвет гистограмм был зеленым. Этому очень помогает подсветка логических связей между элементами (буква “R” в статус-строке).

### 7.11. Трассировка проводников

Автоматическая разводка проводников на поверхности печатной платы проводится программой **PC-ROUTE**. Для ее успешной работы необходимо прежде всего задать стратегию трассировки. В состав пакета входит эталонный файл стратегии *PCAD1.CTL*, который автоматически копируется в рабочую директорию и может быть адаптирован к особенностям данного проекта.

Грамотное задание стратегии требует понимания особенностей проектирования и производства печатных плат. Поскольку у студентов подобный опыт отсутствует ограничимся формальным рассмотрением работы с автотрассировщиком и укажем только основные пункты, которые необходимо изменить в эталонном файле *PCAD1.CTL*.

После запуска программы командой

`pcroute + [Enter]`

на экране появляется основное меню программы (рис. 7).

В первом пункте указывается имя входной базы данных (файл <Имя.PLC>). Во втором пункте при первоначальном запуске в качестве файла стратегии указан эталонный файл *PCAD1.CTL*. Выбор файлов (**из числа имеющихся**) производится клавишей [пробел].

Редактирование стратегии трассировки возможно после активизации первого подпункта в разделе “**Options**” (“Edit routing strategy”). При этом на экране появляется меню редактирования стратегии, включающее 6 разделов. Очень кратко рассмотрим возможности изменения стратегии, заложенные в этом меню.

В первом разделе можно задать систему измерения, шаг координатной сетки, количество слоев, тип соединений проводников, порядок трассировки, вид информации на экране. Также можно учесть некоторые особенности проекта, связанные с формой и расположением проводников на плате. Здесь же можно задать дополнительные решетки для трассировки, указать тип переходных отверстий, их расположение, а также параметры процесса оптимизации разведенных проводников.

Во втором разделе задаются правила трассировки, а в третьем - параметры контактных площадок. Четвертый раздел посвящен редактированию параметров печатных проводников (их ширины, величины допустимых зазоров и т.д.). В пятом разделе проводится разбивка цепей по классам, устанавливаются их приоритеты, указываются слои для размещения. В шестом разделе частично повторяются некоторые пункты из других разделов и устанавливаются приоритетные направления трасс.

**К редактированию меню стратегии нужно подходить очень осторожно и при первоначальном знакомстве изменения следует вносить только в 1-й и 4-й разделы!**

*В первом разделе следует установить:*

- **метрическую систему координат** (самая верхняя строчка !);
- принятый в России шаг координатной сетки 1,25 или 2,5 мм;
- количество проводниковых слоев.

Все остальное здесь можно оставить без изменения.

*В четвертом разделе* меню редактирования стратегии необходимо задать минимально допустимую ширину проводников, зазоры между проводником и контактной площадкой, а также зазоры между проводниками.

После установки этих параметров, записи файла стратегии на диск **с новым именем (!)** <Имя.CTL> и выбора его во втором пункте основного меню, запускается автотрассировщик активизацией подпункта “Route” в основном меню программы. Результаты трассировки записываются в файл <Имя.PCB>.

## 7.12. Доработка проекта

Результаты автотрассировки практически всегда требуют доводки в ручном режиме, поскольку остаются неразведенные связи, форма проводников и их расположение зачастую оставляют желать лучшего. Коррекцию проекта проводят в графическом редакторе **PC-CARDS**, используя обычные команды перемещения и редактирования фрагментов изображения. Работа с редактором подробно описана в /1/.

## 7.13. Вопросы для самопроверки

1. Назовите основные программы пакета P-CAD и укажите в какой последовательности и для каких целей они используются при проектировании печатной платы.
2. Для каких целей предназначен графический редактор PC-CAPS? Как он запускается и как проводится его настройка?
3. Какие параметры отображаются в статус-строке редактора PC-CAPS? Укажите их назначение и способ их изменения?
4. Приведите основные команды редактора PC-CAPS и дайте их краткую характеристику.
5. Как формируется изображение на экране в графических редакторах PCAD'a? Укажите назначение команды VLYR.
6. Укажите особенности задания позиционных обозначений элементов и именования цепей в редакторе PC-CAPS.
7. Как извлекаются логические связи и список используемых элементов из файла схемы? Какие файлы при этом используются и формируются?
8. Укажите назначение и особенности графического редактора PC-CARDS. Как создать файл заготовки печатной платы?
9. Для каких целей используется файл перекрестных ссылок? Какова его структура и как он редактируется?
10. Каково назначение программы PREPACK? Укажите ее входные и выходные файлы. Укажите назначение программы PC-PACK. Какие файлы она использует и формирует?
12. Для каких целей используется графический редактор PC-PLACE? Каковы его особенности? Назовите основные команды редактора и дайте их характеристику.
13. Дайте понятие индикаторов качества размещения? Какие индикаторы используются в PC-PLACE и как они включаются? Как предотвратить перемещение элементов при автоматической расстановке? Как производится автоматическое размещение компонентов в PC-PLACE? Какие подготовительные операции необходимо при этом выполнить?
14. Какая программа пакета PCAD используется для трассировки проводников? Дайте понятие стратегии трассировки. Какие основные изменения необходимо внести в файл эталонной стратегии?
15. С какой целью и как проводится редактирование файла печатной платы после окончания трассировки?

## 7.14. Литература по теме

1. Сучков Д.И. Проектирование печатных плат в САПР PCAD 4.5: Учеб.-метод. пособие. -Обнинск: Микрос, 1992. -475 с.
2. Лопаткин А.В., Петров В.В. Введение в PCAD. Графический редактор PC-CAPS: Учебное пособие для начинающих. Вып. 1 - Н. Новгород, 1995.- 19 с.

3. Лопаткин А.В., Петров В.В., Петров Г.А. Введение в PCAD. Взаимодействие программ пакета PCAD при сквозном проектировании печатных плат/ Учебное пособие для начинающих. Вып. 4 - Н. Новгород, 1996.- 23 с.

4. Лопаткин А.В., Петров В.В., Петров Г.А. Введение в PCAD. Графический редактор PC-PLACE. Программа автоматической трассировки PC-ROUTE/ Учебное пособие для начинающих. Вып. 3 - Н. Новгород, , 1996.- 31 с.

## **ЛЕКЦИЯ 10. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РЭС**

*Введение: Необходимость СОТР. Понятие "теплового режима". Влияние теплового режима на надежность.*

*Механизмы теплообмена в РЭС: Теплопроводность. Конвекция. Излучение. Основные схемы СОТР. Воздушное охлаждение. Жидкостное охлаждение. Испарительное охлаждение.*

*Выбор СОТР: Методики выбора. Диаграмма СОТР. Уточнение способа. воздушного охлаждения.*

*Расчет теплового режима блока РЭС: Понятие нагретой зоны. Метод изотермических поверхностей. Метод однородного тела. Электротепловая аналогия. Коэффициентные методы расчета.*

### **10.1. Введение**

Без преувеличения можно сказать, что вопрос обеспечения теплового режима является одним из главных при конструировании РЭС. Определяется это следующим:

-энергетический коэффициент полезного действия радиоэлементов, как правило, невелик, и большая часть потребляемой от источников питания энергии превращается в тепловую энергию с соответствующим перегревом элементов и аппаратуры;

-комплексная микроминиатюризация РЭС приводит к значительному росту удельной мощности тепловыделения, что дает существенные локальные перегревы;

-освоение космического пространства, увеличение высоты и скорости полета современных самолетов, совершенствование подводного и надводного флота, освоение различных климатических зон Земли привели к ужесточению внешних тепловых условий при эксплуатации РЭС.

В общем случае под тепловым режимом понимают пространственно-временное распределение температуры внутри и на поверхности изделия, обусловленное внутренними и внешними источниками тепла.

Важность обеспечения нормального теплового режима для всех элементов конструкции обусловлена тем, что увеличение тепловой нагрузки на РЭС, как правило, приводит к значительному снижению надежности работы устройства.

На рис. представлен график зависимости интенсивности отказов от температуры (заштрихованная область), полученный при обработке данных по отказам большого числа блоков РЭС с воздушным охлаждением. Из рисунка видно, насколько велико влияние температурного режима на надежность.

Нормальный тепловой режим в РЭС поддерживают специально сконструированные системы обеспечения тепловых режимов (СОТР), каждая из которых характеризуется особенностями структуры, интенсивностью теплоотвода, техническими показателями (массой, габаритами, потребляемой мощностью, стоимостью, надежностью и т.д.).

### **10.2. Механизмы теплообмена в РЭС**

Перенос тепла внутри блока РЭС может происходить посредством трех различных механизмов: теплопроводности, конвекции и излучения.

Теплопроводность - передача тепла в твердых телах, вызванная разностью температур отдельных участков тела и осуществляющаяся с помощью электронов проводимости (в металлах) или за счет колебаний кристаллической решетки (в диэлектриках).

Конвекция - теплопередача, обусловленная перемещением массы жидкости или газа из области с высокой температурой в область с более низкой температурой.

Теплообмен посредством излучения зависит от температуры излучающего и облучаемого тела и оптических свойств этих тел.

По данным /1/ в конструкциях РЭС при нормальных климатических условиях и естественном охлаждении около 0 % тепла отводится за счет конвекции, приблизительно 0 % - за счет излучения и около 0 % - за счет теплопроводности.

Таким образом основную роль в обеспечении теплового режима РЭС играет конвективный теплообмен.

### 10.3. Основные схемы СОТР

При конвективном отводе тепла от РЭС используются теплоносители в различных фазовых состояниях, перемещение которых осуществляется естественным или принудительным образом. По этим признакам способы охлаждения РЭС можно разделить на следующие основные классы: газовое (воздушное), жидкостное, испарительное естественное или принудительное охлаждение.

Естественное воздушное охлаждение является наиболее простым, надежным и дешевым способом охлаждения РЭС, не требующим затрат дополнительной энергии. Однако интенсивность такого охлаждения невелика, поэтому он используется при небольших удельных мощностях рассеивания тепла  $q$  ( $q < 0,2$  Вт/см<sup>2</sup>). При естественном воздушном охлаждении конвективный обмен осуществляется между элементами РЭС и воздухом, причем воздух перемещается за счет тепловой энергии. Различают две основные схемы естественного воздушного охлаждения блоков (РЭМ2) и стоек (РЭМ3) РЭС: с герметичным или перфорированным кожухом. В герметичном (или пылезащищенном) кожухе конвективный теплообмен осуществляется от элементов РЭС к воздуху внутри аппарата, от воздуха к кожуху, от кожуха к окружающей среде. При перфорированном кожухе конвективный теплообмен в основном происходит между элементами РЭА и окружающей средой с помощью воздуха, проникающего сквозь отверстия. Для приближенных оценок можно считать, что введение вентиляционных отверстий при их рациональном расположении снижает перегревы внутри блока примерно на 20 % /3/.

Принудительное воздушное охлаждение получило наибольшее распространение, так как при невысокой стоимости и относительной простоте обеспечивает нормальный тепловой режим при более высоких удельных мощностях рассеивания ( $q < 1$  Вт/см<sup>2</sup>). По некоторым данным до 5 % выпускаемой аппаратуры используют этот способ охлаждения /2/. Различают три основные схемы принудительного воздушного охлаждения: внутреннее перемешивание (вентилятор установлен внутри герметичного кожуха), наружный обдув (обдувается герметичный кожух) и продувка (воздух из окружающей среды или предварительно охлажденный пропускается через специальные каналы и охлаждает непосредственно элементы РЭС). Последняя схема применяется наиболее широко.

Естественное жидкостное охлаждение платы с элементами или отдельных элементов заключается в погружении их в бак с жидкостью. Применяется редко, так как усложняется конструкция и требуются специальные изолирующие покрытия.

Принудительное жидкостное охлаждение применяется при высоких удельных мощностях рассеивания ( $q < 20$  Вт/см<sup>2</sup>). Наибольшее распространение этот способ получил при охлаждении больших элементов, когда однофазная жидкость прокачивается насосом через специальные каналы в охлаждаемых узлах приборов (электроды мощных ламп, трансформаторы и т.д.). При отводе тепла от блоков жидкость прокачивается через каналы, выполненные в платах или кожухе аппарата.

Испарительное охлаждение (естественное и принудительное) позволяют отводить еще большие потоки тепла ( $q < 200$  Вт/см<sup>2</sup>). Охлаждаемый элемент или погружается в жидкость или жидкость прокачивается через специальные каналы, но, в отличие от жидкостного охлаждения, происходит интенсивный процесс парообразования. Среди систем испарительного охлаждения РЭС достаточно широкое применение получают фитильные системы и так называемые "тепловые трубки", имеющие замкнутый объем. В этих системах для транспортировки жидкости используется капиллярный эффект. Охлаждаемая

поверхность не погружается в жидкость, а смачивается жидкостью, находящейся в капиллярах фитиля, обволакивающего поверхность. При нагревании жидкость испаряется, пар под действием избыточного давления перемещается к месту крепления радиатора или охладителя. Здесь он конденсируется на стенках, впитывается фитилем и за счет капиллярного эффекта перемещается к месту нагрева.

### 10.4. Выбор СОТР

К настоящему времени разработано множество специальных методик для предварительной оценки теплового режима будущей конструкции РЭС даже на стадии эскизного проектирования, когда разрабатываются еще только схемы принципиальные электрические. Грамотное применение этих методик позволяет существенно сократить сроки проектирования и отбросить явно неудачные решения. Расчеты по этим методикам достаточно просты и требуют минимального количества исходной информации, получаемой из Технического Задания на проектирование (ТЗ) или путем несложных конструктивных прикидок.

Для примера, на рис. 2 приведена специальная диаграмма, на которой очерчены области целесообразного применения различных способов охлаждения в зависимости от

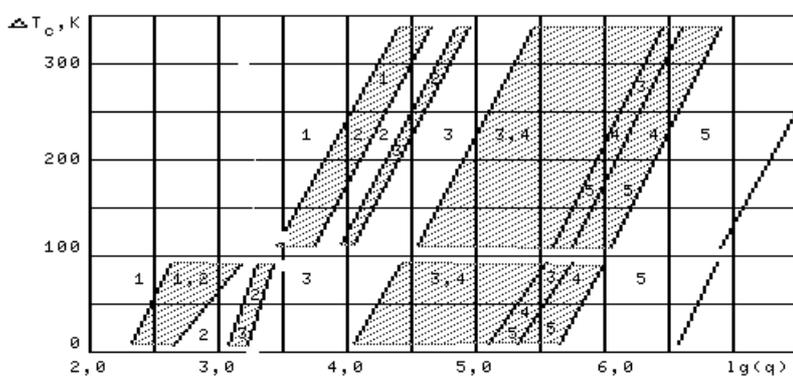


Рис. 2. Выбор системы охлаждения

плотности

теплового потока  $q$  через поверхность блока и допустимого перегрева элементов РЭС  $\Delta T_c$ . Незаштрихованные области соответствуют одному способу охлаждения, в заштрихованных областях можно с успехом использовать два или даже три способа охлаждения. Цифры на рисунке обозначают следующие способы охлаждения: 1 - естественно-воздушное; - принудительное воздушное; - естественно-жидкостное; - принудительное жидкостное; - естественно-испарительное; - принудительное испарительное. Нижняя часть диаграммы относится к блокам, а верхняя часть к отдельным элементам.

Результаты, полученные по диаграмме на рис. 1, могут уточняться дополнительными тепловыми расчетами. Так, например, для воздушного охлаждения можно дополнительно воспользоваться графиками на рис. 2 /3/.

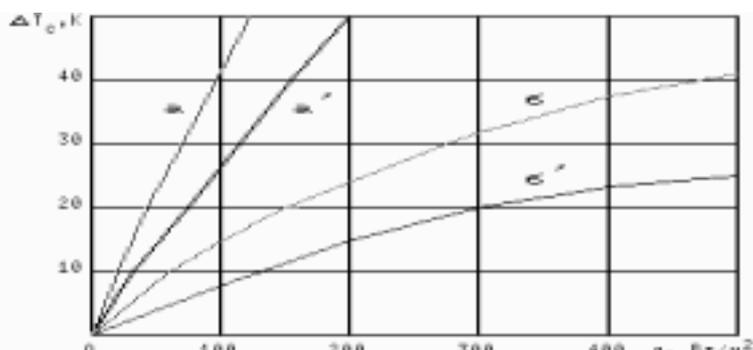


Рис. 2. Диаграмма оценки теплового режима при воздушном охлаждении РЭС

Если точка на этом рисунке лежит выше линии а (горизонтальное расположение плат в блоке) или а' (вертикальное расположение плат), возможна пылезащищенная или герметичная конструкция блока. Если точка находится ниже линии б (б'), необходимо принудительное воздушное охлаждение. Когда точка лежит между линиями а, б (а', б'), возможно использование перфорированных корпусов при естественном охлаждении.

### 10.5. Расчет теплового режима блока РЭС

Реальный радиоэлектронный аппарат в теплофизическом отношении представляет собой очень сложную систему с большим количеством источников тепла с границами неправильной формы. Полную систему уравнений теплообмена для реального аппарата часто невозможно не только решить аналитически или численно, но и строго записать. В связи с этим процессы протекающие в реальном аппарате схематизируют, принимая ряд упрощающих предпосылок. В результате получают тепловую модель аппарата для которой и проводят расчет теплового режима.

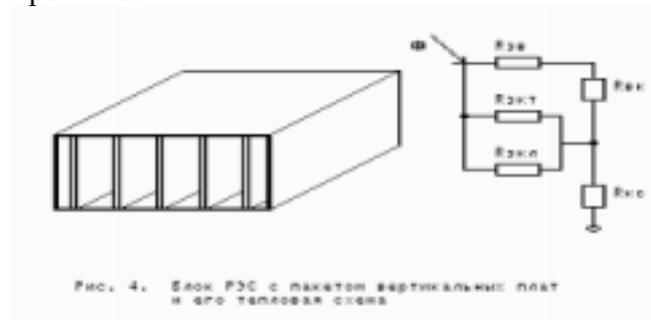


Рис. 4. Блок РЭС с пакетом вертикальных плат и его тепловая схема

Один из наиболее известных способов упрощения состоит в замене сложной по форме нагретой зоны конструкции аппарата (например, субблока с разногабаритными комплектующими элементами, выделяющими разное количество тепла) прямоугольным параллелепипедом - эквивалентной нагретой зоной с одинаковой среднеповерхностной температурой и равномерно распределенными источниками тепловой энергии. Такая замена выполняется на основании принципа усреднения. В результате рассчитывается тепловой режим не реальной конструкции, а эквивалентного однородного тела с границами простой формы. Точность исследования температурного режима определяется в основном степенью детализации конструкции. Например, при исследовании блока РЭС, включающего несколько печатных плат (субблоков), как показано на рис., в качестве нагретой зоны можно принять весь пакет плат. Тепловая модель при этом будет иметь вид, показанный на рис. а. В результате исследования этой модели можно определить среднеповерхностную температуру нагретой зоны, используя достаточно простые коэффициентные методы



Рис. 5. Тепловые модели блока РЭС с пакетом субблоков

расчета.

### 5.1. Метод изотермических поверхностей

Если эта температура значительно отличается от температуры субблока, расположенного в центре пакета, т.е. точность расчета неудовлетворительна, в качестве

нагретой зоны можно рассматривать отдельный субблок. Тепловая модель примет вид, изображенный на рис.,б. При таком подходе для описания тепловых процессов необходимо использовать систему неоднородных алгебраических уравнений, которые составляются на основании закона сохранения энергии с использованием выражений, описывающих перенос тепловой энергии  $\Phi_k$  от изотермической поверхности с температурой  $Q_k$  к изотермической поверхности с температурой  $Q_i$

$$\Theta_i - \Theta_k = F_{i,k}\Phi_k \text{ или } \Theta_k - \Theta_i = F_{k,i}\Phi_i.$$

Структура коэффициентов пропорциональности  $F_{i,k}$  зависит от задействованных в каждом конкретном случае способов переноса тепловой энергии. Число уравнений определяется количеством нагретых зон. Так например, для модели на рис. 5,а уравнений теплового баланса будет три: для пакета субблоков, воздуха внутри корпуса и самого корпуса. Таким образом, рассчитывается тепловой режим по методу изотермических поверхностей.

### 10.5.2. Метод однородного тела

Еще более точные результаты расчета теплового режима получатся при использовании метода однородного тела. В этом случае тепловая модель блока представлена нагретой зоной в виде однородного анизотропного тела, свойства которого характеризуются эффективными значениями коэффициентов теплопроводности  $\lambda$  и теплоемкости  $C$ . Такая модель для блока РЭС показана на рис. 5,в. Тепловые процессы в ней описываются дифференциальным уравнением в частных производных вида

$$\lambda_x d^2 \Theta / dx^2 + \lambda_y d^2 \Theta / dy^2 + \lambda_z d^2 \Theta / dz^2 = F(\Phi_u, C),$$

где  $\Phi_u$  - удельная мощность внутренних источников тепла.

Такие дифференциальные уравнения должны решаться с учетом нелинейных условий на границе нагретого тела, что является очень непростой задачей. Сложность записи и решения ограничивают применение данного метода.

### 10.5.3. Электротепловая аналогия

При расчете и исследовании тепловых режимов довольно часто используется так называемая электротепловая аналогия, основанная на том, что исходные закономерности для электрических и тепловых полей формулируются одинаково и, следовательно, описываются сходными дифференциальными уравнениями. Это дает возможность для расчета тепловых режимов составлять тепловые схемы подобные электрическим, а для исследования тепловых режимов использовать аналоговые вычислительные машины.

Для примера на рис. 4 представлена схема передачи тепла в блоке РЭС от нагретой зоны к окружающей среде. С помощью соответствующих сопротивлений (проводимостей) схема учитывает основные способы передачи тепла от нагретой зоны воздуху в корпусе (конвекция -  $R_{зв}$ ), непосредственно корпусу за счет лучеиспускания ( $R_{зкл}$ ) и теплопроводности ( $R_{зкт}$ ). Сопротивление  $R_{вк}$  учитывает особенности передачи тепла от воздуха в корпусе самому корпусу, а сопротивление  $R_{кс}$  зависит от особенностей передачи тепла от корпуса в окружающую среду.

По данной схеме легко составить систему уравнений теплового баланса (по методу изотермических поверхностей)

$$\Phi = \sigma_{зв}(Q_з - Q_в) + (\sigma_{зкт} + \sigma_{зкл})(Q_з - Q_к);$$

$$\sigma_{зв}(Q_з - Q_в) = \sigma_{вк}(Q_в - Q_к);$$

$$\Phi = \sigma_{кс}(Q_к - Q_с),$$

где  $Q_з$ ,  $Q_к$ ,  $Q_с$  - температуры узловых точек (нагретой зоны, корпуса и среды). Тепловые сопротивления (проводимости) рассчитываются, исходя из особенностей конструкции, применяемых материалов и механизма теплопередачи.

### 10.5.4. Коэффициентные методы расчета

Для РЭС с воздушным охлаждением (естественным и принудительным), составляющих большинство выпускаемых изделий для оценки тепловых режимов как правило используют методики, базирующиеся на тепловой модели, изображенной на рис. 5,а и реализующие так называемый коэффициентный метод расчета. Суть его сводится к следующему:

- расчет теплового режима проводится в два или три этапа. На первом этапе определяется среднеповерхностная температура шасси (платы) с расположенными на них элементами, среднеповерхностная температура кожуха (корпуса) и средняя температура воздуха в нем. На втором этапе по результатам первого этапа оцениваются среднеповерхностные температуры поверхности отдельных элементов на плате. На третьем этапе, если это необходимо рассчитывают максимальные температуры критических зон внутри элементов и определяют их функциональные связи со среднеповерхностными температурами как плат так и корпусов;

- связь между перегревом нагретой зоны и влияющими факторами представляется в виде произведения вида

$$\theta_3 = \Pi K_i,$$

где  $\theta_3$  - перегрев нагретой зоны относительно температуры окружающей среды, а каждый коэффициент  $K_i$  зависит от одного параметра (фактора), влияющего на величину  $\Delta z$ . Величины коэффициентов рассчитываются по формулам или определяются по графикам, построенным по результатам обработки большого количества эмпирических данных.

Сопоставительный анализ, результаты которого приведены в /2/, позволил рекомендовать для практического использования методики /2/, которые подробно рассмотрены в методических указаниях к лабораторной работе /4/.

### 10.6. Литература по теме

1. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. - М.: Высшая школа, 1984.-47 с.
2. Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА. - М.: Сов. радио, 1976, 32 с
3. Гелль П.П., Иванов-Есипович Н.К. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. - Л.: Энергоатомиздат. 1984. -536 с.
4. Лопаткин А.В. Расчет и исследование тепловых режимов РЭС. /Методические указания к лабораторной работе N по дисциплине "Основы конструирования и технологии РЭС" - (в печати)

### 10.7. Вопросы для самопроверки

1. Как влияет тепловой режим на основные показатели качества РЭС?
2. Каковы основные механизмы теплопереноса в РЭС ? От каких факторов зависит интенсивность теплопередачи для различных механизмов?
3. Назовите и охарактеризуйте основные классы способов охлаждения РЭС
4. Как можно выбрать способ охлаждения на ранних стадиях проектирования РЭС?
5. Назовите и охарактеризуйте основные способы расчета теплового режима. Какой из способов применим на ранних стадиях проектирования ? Насколько он достоверен?
6. Какие основные упрощения используются при расчетах тепловых режимов РЭС?
7. Что такое "тепловая трубка" ? Как она устроена и в каких случаях используется?
8. В чем заключается, на чем основывается и как используется понятие "электротепловой аналогии"?

## **ЛЕКЦИЯ 11. ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА СВОЙСТВА РЭС**

*Введение: Атомная энергетика - "светлое" будущее всего человечества.*

*Классификация радиоактивных излучений: Корпускулярные и квантовые излучения. Параметры излучений.*

*Единицы измерения основных характеристик излучений: Грей. Эквивалентная доза. Зиверт. Экспозиционная доза. Нэд.*

*Классификация воздействий излучения на РЭС: Обратимые и необратимые изменения. Объемные и поверхностные нарушения.*

*Влияние радиоактивных излучений на полупроводники: Физика влияния. Биполярные транзисторы. Кремний и германий. Тепловой нагрев. Полевые транзисторы.*

*Влияние излучений на резисторы, конденсаторы и катушки: Дискретные резисторы. Резисторы ИС. Дискретные конденсаторы. Конденсаторы ИС. Стойкость моточных изделий.*

### **11.1. Введение**

Не секрет, что запасы традиционных источников энергии (угля, нефти, газа) на Земле не бесконечны. Добывать их с каждым годом становится все труднее и все острее встает вопрос об альтернативных источниках энергии. Учитывая стремительно нарастающие темпы потребления невозобновляемых видов топлива, следует уже сейчас проводить разработки в области создания и совершенствования новых видов энергии. Хотим мы этого или нет, но атомная энергетика среди них играет и будет играть ведущую роль. Это следует учитывать и к этому нужно быть готовым.

Безопасность работы атомных станций во многом обуславливается используемыми там радиоэлектронными средствами, которые подвергаются весьма специфическим видам воздействий, а именно, радиационным (радиоактивным). Поскольку радиоактивные излучения, проникая в толщу материала, вызывают в нем ионизацию, то часто они называются ионизирующими. В этой лекции рассматриваются некоторые аспекты разработки РЭС, обладающих повышенной стойкостью к такого рода воздействиям. Авария на черновыльской АЭС показала насколько эта проблема актуальна и насколько она мало разработана.

### **11.2. Классификация радиоактивных излучений**

Радиоактивные излучения подразделяются на корпускулярные и квантовые. Первые представляют собой потоки быстрых элементарных частиц (нейтронов, протонов, ядер атомов химических элементов, бета, альфа и других частиц), вторые - электромагнитные ионизирующие излучения (гамма и рентгеновское).

Количественно радиоактивное излучение характеризуется следующими параметрами:

- поток радиоактивных частиц или квантов  $\Phi$  ( $\text{с}^{-1}$ ),

$$\Phi = n/t,$$

где  $n$  - число частиц или квантов,  $t$  - время ( $\text{с}$ );

- плотность потока частиц или квантов  $t$  ( $\text{с}^{-1}\text{м}^{-2}$ ),

$$t = \Phi/S,$$

где  $S$  - поверхность ( $\text{м}^2$ );

- кинетическая энергия излучения  $E$ , эВ (электронВольт),

$$E = qU,$$

где  $q$  - заряд частиц (Кл),  $U$  - разность потенциалов (В);

- поглощенная доза излучения  $D$ , Гр (Грей),

$$D = E/m,$$

где  $m$  - масса облучаемого вещества, кг;

- мощность поглощенной дозы радиоактивного излучения  $P$ , Гр/с,

$$P = DD/Dt,$$

где  $DD$  - увеличение поглощенной дозы за время  $Dt$ ;  
- экспозиционная доза рентгеновского и гамма-излучения (экспозиция)  $Dэ$ , Кл/кг (Кулон/кг),

$$Dэ=Q/m,$$

где  $Q$  - сумма электрических зарядов ионов, имеющих одинаковый знак и возникающих в воздухе, когда все электроны, освобожденные с помощью квантов рентгеновского и гамма-излучений в элементарном объеме воздуха, полностью тормозятся;  
 $m$  - масса элемента объема воздуха;

мощность экспозиционной дозы  $Pэ$ , А/кг,

$$Pэ=DDэ/Dt,$$

где  $DDэ$  - увеличение экспозиционной дозы за время  $Dt$ .

### 11.3. Единицы измерений основных характеристик излучений

Для измерения поглощенной дозы радиоактивного излучения применяется специальная единица - грей. Один грей (1 Гр) равен дозе излучения, при которой облученному веществу массой кг передается энергия любого ионизирующего излучения Дж.

Произведение поглощенной дозы на коэффициенты, учитывающие преобразование энергии, принято называть эквивалентной дозой  $Dед$ :

$$Dед=D*Kк*Kр*Kи,$$

где  $Kк$  - коэффициент качества излучения, учитывающий линейное преобразование энергии и позволяющий использовать единую шкалу для всех видов радиоактивных излучений;  $Kр$  - коэффициент распределения, учитывающий степень неравномерности поглощения энергии веществом;  $Kи$  - коэффициент интенсивности излучения, учитывающий плотность энергии радиоактивного излучения.

Единицей измерения эквивалентной дозы является зиверт. За один зиверт (1 Зв) принимается такая эквивалентная доза любого вида излучения, которая при хроническом облучении вызывает такой же эффект, что и Гр рентгеновского или гамма-излучений.

Эквивалентная и поглощенная дозы отличаются лишь безразмерными коэффициентами. Поглощенная доза зависит от природы материала, конструктивных особенностей и режимов работы оборудования. Поэтому для конкретизации меры количества радиоактивного излучения приняты единицы поглощенной энергии специально выбранными стандартными и образцовыми веществами. Эти единицы называют экспозиционными дозами.

Стандартным веществом для рентгеновского и гамма-излучений в России выбран сухой воздух при нормальных условиях (в США - углерод); для определения экспозиционной дозы протонов и электронов - кристалл иодистого натрия (NaI), активированный талием (Tl); для нейтронов - тканеэквивалентный газ, т.е. такая смесь газов, в которой концентрации водорода и азота равны их концентрации в мягкой ткани человека.

В качестве единицы экспозиционной дозы нейтронного излучения применяют нед - нейтронная единица дозы.

### 11.4. Классификация воздействий излучений на РЭС

Компоненты электронной аппаратуры, подвергнутой воздействию радиоактивных излучений, могут изменять свои параметры. При этом различают необратимые (остаточные) и обратимые (временные) изменения.

Необратимые нарушения связаны с изменением структуры применяемых материалов (прежде всего полупроводниковых). К таким нарушениям относятся: перегруппировка атомов в кристаллической решетке; появление вакансий, междоузельных атомов, дислокаций; внедрение инородных атомов.

Обратимые нарушения, например в интегральных схемах, наблюдаются при переходе электронов и дырок в неравновесное состояние, которое из-за большой подвижности носителей заряда быстро восстанавливается после прекращения облучения. Тем не менее и обратимые изменения могут ухудшать параметры РЭС, вызывая увеличение токов утечки и снижение сопротивления изоляционных, полупроводниковых и проводящих материалов.

В зависимости от вида и энергии излучения процессы, приводящие к нарушениям, могут происходить по всему объему материала или только в приповерхностном слое.

Нейтроны и гамма-кванты обладают высокой проникающей способностью, и поэтому вызываемые ими изменения, как правило, носят объемный характер. Естественно, они могут приводить и к поверхностным изменениям.

Альфа-частицы и осколки ядер воздействуют только на поверхность.

Протоны и электроны (бета-излучение) могут приводить к дефектам как в поверхностном слое, так и в объеме материала, поскольку глубина их проникновения зависит от энергии частиц и возникновения в данном материале вторичных ионизирующих излучений.

### **11.5. Влияние радиоактивных излучений на полупроводники**

Влияние радиоактивных излучений на электрические свойства полупроводников связано с появлением новых энергетических уровней в запрещенной зоне. Некоторые из них (центры рекомбинации) могут захватывать носители зарядов, в результате чего уменьшается эффективное время жизни последних и заметно ухудшаются основные параметры полупроводниковых приборов и интегральных схем (ИС).

Интенсивность возникающих при облучении процессов рекомбинации носителей зарядов существенно различна для разных полупроводниковых материалов. Например, на дефектах в кристаллической решетке кремния, облученного нейтронами, рекомбинация в 10 раз активнее, чем на дефектах в облученном германии. Поэтому германий - радиационно более стойкий материал, чем кремний. Как правило, материалы с меньшим удельным электрическим сопротивлением являются радиационно более стойкими.

Наиболее чувствительны к облучению в полупроводниковых приборах р-п переходы и область базы. Транзисторы с узкой базой выдерживают большую дозу облучения, чем транзисторы с широкой базой, так как эффективность работы транзистора тем выше, чем меньше рекомбинирует при прохождении через базу инжектированных в нее неосновных носителей. Следовательно, высокочастотные транзисторы радиационно более стойкие, чем низкочастотные.

Наряду с нарушениями структуры материалов при облучении происходит также их нагрев вследствие преобразования поглощенной энергии радиоактивного излучения в тепловую. В связи с этим в ряде случаев целесообразнее использовать материалы, менее стойкие к облучению, но более стойкие к воздействию повышенных температур. Здесь ситуация с германием и кремнием противоположная.

Максимальный ток в канале полевого транзистора с р-п переходом определяется главным образом концентрацией свободных носителей заряда в канале. Поскольку при облучении быстрыми нейтронами эта концентрация уменьшается, уменьшается и максимальный ток. Стокозатворная и стоковая характеристики этих транзисторов практически не зависят от поверхностных эффектов, что определяет их высокую стойкость к радиоактивным излучениям. Предельная поглощенная доза для них может составлять 10<sup>7</sup> Гр.

Изменение параметров МДП-транзисторов в результате воздействия радиоактивного излучения обусловлено главным образом радиационными эффектами в диэлектрике затвора и на границе диэлектрик-полупроводник. Повышенная концентрация дефектов в переходном слое связана с различием в строении и физических свойств полупроводника и диэлектрика. Контактное взаимодействие двух материалов с различными кристаллическими решетками приводит к возникновению дефектов в виде оборванных и напряженных валентных связей в переходном

слое. При воздействии радиационного излучения на структуру диэлектрик-полупроводник наблюдается увеличение плотности поверхностных состояний и образование пространственного заряда в объеме диэлектрика. Плотность наведенного облучением заряда определяется поглощенной дозой ионизирующего излучения, значением и полярностью приложенного к затвору напряжения, концентрацией ловушек. В пленке диоксида кремния в результате облучения происходит накопление положительного пространственного заряда. Это приводит к изменению поверхностной концентрации носителей заряда, образованию поверхностных проводящих каналов, появлению поверхностного тока утечки и уменьшению пробивного напряжения.

### 11.6. Влияние излучения на резисторы, конденсаторы и катушки

Стойкость резисторов к радиоактивному излучению зависит от технологии их изготовления и исходных материалов. Пленочные металлические резисторы обладают большей радиационной стойкостью, чем углеродистые. В свою очередь резисторы из чистых металлов имеют большую радиационную стойкость, чем резисторы из сплавов или оксидов металлов.

Степень радиационных нарушений в пленочных углеродистых резисторах зависит от вида защитного покрытия. Резисторы, опрессованные в пластмассу, противостоят облучению лучше резисторов с корпусами из керамики, стекла и эпоксидной смолы, причем стойкость резисторов повышается, если вместо воздуха корпуса заполнены внутри азотом или гелием.

Диффузионные резисторы ИС подвержены резкому влиянию радиации. Их стойкость существенно зависит от изоляции элементов ИС. Наименее чувствительны к радиоактивному излучению резисторы с диэлектрической изоляцией, а наиболее чувствительны - резисторы, изолированные р-п переходом. Это объясняется тем, что обратновключенные р-п переходы оказывают шунтирующее действие, так как обратный ток диодов при радиоактивном облучении значительно возрастает.

Радиационная стойкость конденсаторов определяется технологией их изготовления и применяемыми материалами. Как показывает практика, органические диэлектрики почти на порядок более чувствительны к радиоактивным излучениям, чем неорганические.

Барьерная емкость закрытого р-п перехода, часто используемая в качестве конденсатора ИС, очень чувствительна к облучению. При больших дозах облучения эта емкость существенно увеличивает время переключения логических ИС, а следовательно, снижает их быстродействие.

Тонкопленочные структуры типов МДМ и МДП, также используемые в качестве конденсаторов ИС, радиационно более стойки. Их удельная емкость практически не меняется при поглощенной дозе радиоактивного излучения  $10^6 \dots 10^7$  Гр и потоке быстрых нейтронов плотностью до  $10^{16}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Наиболее чувствительным параметром тонкопленочных конденсаторов является проводимость диэлектрической пленки, которая при облучении в большинстве случаев увеличивается.

У дискретных конденсаторов после 70...100 часов облучения на 2...3 порядка падает сопротивление утечки и на 20-30 % уменьшается емкость. Наиболее стойкими являются керамические конденсаторы, затем слюдяные и фторопластовые. Наименее стойкие - электролитические (в том числе и танталовые).

Радиационная стойкость катушек индуктивности определяется в основном степенью повреждения материалов. Катушки индуктивности без сердечника и пленочные спиральные катушки индуктивности наиболее стойки к радиации. За счет радиационного изменения активного сопротивления катушки индуктивности может незначительно измениться ее добротность. Однако этот эффект не проявляется при облучении потоками плотностью до  $10^{18}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>.

Индуктивность пленочных катушек с ферромагнитными пленками при большой дозе облучения (до  $10^5$  Гр) уменьшается за счет радиационного изменения магнитной

проницаемости сердечников. При таких дозах облучения в катушках индуктивности покрытых защитными лаками или смолами, происходят механические разрушения конструкции катушек и уменьшение сопротивления изоляции.

Значительно меньше подвержены воздействию радиации силовые и низкочастотные трансформаторы и дроссели, реле, электродвигатели.

### 11.7. Литература по теме

1. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники/ Под ред. Е.А. Ладыгина. -М.: Сов. радио, 980

### 11.8. Вопросы для самопроверки

1. Как классифицируются радиоактивные излучения?
  2. Назовите основные характеристики излучений и единицы их измерений
  3. Как классифицируются виды воздействий излучений на параметры РЭС?
  4. Как влияют радиационные излучения на параметры транзисторов? Как зависит стойкость транзистора от материала из которого он изготовлен?
  5. Как влияют радиоактивные излучения на параметры микросхем?
  6. Какие конденсаторы и резисторы наиболее стойки к воздействию излучений?
- Как меняются параметры моточных изделий под воздействием излучений?

## **ЛЕКЦИЯ 12. ВЫБОРОЧНЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА РЭС**

**Введение:** Необходимость выборочного контроля. Японское чудо. Всеобщий контроль качества. Стандарты ISO.

**Основные понятия выборочного контроля:** Случайная выборка. Статистические гипотезы и их проверка. Риски поставщика и заказчика. Приемочный и браковочный уровни качества. Исходные данные для разработки плана контроля.

**Принцип построения плана выборочного контроля:** Условие приемки партии хорошего качества. Условие браковки партии плохого качества. Интервал неопределенности и его уменьшение.

**Контроль качества методом однократной выборки:** Суть метода. Распределения доли дефектных изделий в выборке. Аппроксимация Пирсона. Расчет приемочного числа и объема выборки.

### **12.1. Введение**

Очень часто при контроле качества и испытаниях РЭС проверяются и испытываются не все изготовленные изделия, а лишь небольшая их группа. Вызывается это экономическими причинами, когда контроль очень дорог, или техническими причинами, когда в результате контроля или испытаний изделия вырабатывают ресурс, теряют товарный вид или разрушаются. Такой вид контроля называется *выборочным контролем качества*. Планирование и обработка результатов такого контроля проводится методами математической статистики, поэтому выборочный контроль часто называют *статистическим контролем качества*.

Поразительные успехи японской промышленности во многом объясняются тем, что статистические методы контроля были внедрены в широкую практику, повсеместно и неукоснительно исполнялись на всех уровнях. Японскими специалистами были отобраны наиболее простые правила для оценки динамики изменения качества продукции и его наглядного представления. Эти правила выражены самыми простейшими словами и японские рабочие выучивают их наизусть, как молитву. Сейчас и в Японии и в Европе осуществляется переход к *Всеобщему Контролю Качества (Total Quality Control)*, предполагающему участие и сотрудничество всех без исключения работников фирмы.

Непременным условием международного сотрудничества предприятий становится внедрение на каждом из них европейских стандартов качества ISO 9000, предусматривающих определенную систему организационных и технических мероприятий.

### **12.2. Основные понятия выборочного контроля**

#### **12.2.1. Случайная выборка**

Группу изделий, отобранных для проверки или испытаний называют *выборкой* или *случайной выборкой*, подчеркивая тот факт, что изделия для проверки отбираются *случайным образом*.

*У каждого изделия из партии должна быть одинаковая вероятность попасть в выборку для обеспечения ее репрезентативности (представительности).*

#### **12.2.2. Статистические гипотезы и их проверка**

Выборочный контроль проводят с использованием методов проверки статистических гипотез. Напомним, что *статистической гипотезой* называется высказывание о виде функции распределения случайной величины (непараметрическая гипотеза) или числовых параметрах этого распределения (параметрическая гипотеза).

Гипотеза, однозначно определяющая вид функции или значение числового параметра, называется *простой*, а допускающая некоторый набор значений – *сложной*.

Правила или отличительные признаки, позволяющие принять или отвергнуть статистическую гипотезу, называют *критериями статистических гипотез*.

Проверка статистических гипотез базируется на предположении, что в условиях небольшого числа испытаний события с малыми вероятностями происходить не должны (*практически невозможные события*). Таким образом, если вычисленная на основе выдвинутой гипотезы вероятность некоторого события  $A$  мала, но в результате испытаний это событие тем не менее происходит, есть повод усомниться в достоверности выдвинутой гипотезы.

Максимальная вероятность, при которой событие можно считать практически невозможным, называется *уровнем значимости*.

Как правило, при проверке статистических гипотез наряду с основной гипотезой  $H_0$  выдвигается конкурирующая  $H_1$ , которая принимается, если основная гипотеза будет отвергнута.

При выборочном контроле "*основная*" статистическая гипотеза  $H_0$  - ["партия изделий хорошего качества"], "*альтернативная*" или "*конкурирующая*" гипотеза  $H_1$  - ["партия изделий плохого качества"].

### 12.2.3. Риски поставщика и заказчика

Естественно, что партии изделий хорошего качества должны по результатам контроля приниматься, а партии изделий плохого качества браковаться. Но, поскольку изделия в выборку попадают случайным образом, может получиться так, что из партии изделий хорошего качества в выборку попадет такое количество дефектных изделий, что по результатам проверки партия будет забракована. Такое ошибочное решение называется *ошибкой I-го рода*. Может получиться и так, что из партии изделий плохого качества в выборку попадет сравнительно мало дефектных изделий и партия по результатам проверки будет принята. Это *ошибка II-го рода*.

Вероятность браковки партии хорошего качества при статистическом контроле называется *риском поставщика* (изготовителя), а вероятность приемки партии плохого качества - *риском заказчика* (потребителя). Риски поставщика и заказчика зависят от качества проверяемой партии изделий и используемого плана контроля. Естественно потребовать, чтобы риски эти были минимальны, но реально обеспечить это удастся только при сплошном контроле, когда проверяются все изделия из партии. План же выборочного контроля всегда исходит из некоторых *экономически допустимых величин рисков поставщика и заказчика*. Определяющим здесь является соотношение стоимости контроля и потерь, связанных с браковкой партии хорошего качества или приемкой партии плохого качества.

### 12.2.4. Приемочный и браковочный уровни качества

Для разработки плана контроля понятия "партия хорошего качества" и "партия плохого качества" необходимо конкретизировать. Наиболее просто это сделать, исходя из доли бракованных изделий в партии  $q=M/N$ , где  $N$  - число изделий в партии (объем партии), а  $M$  - число бракованных изделий в партии. Задав по экономическим соображениям допустимую долю брака  $q_0$ , получим при  $q \leq q_0$  - партию хорошего качества, а при  $q > q_0$  - партию плохого качества. Однако на практике такой подход не допустим. Докажем это на простом примере. Заметим, что при выборочном контроле качества реальная доля брака  $q$  в партии всегда остается неизвестной, а известна лишь ее оценка (ориентировочное значение)  $q^*$ , найденная по выборке

$$q^* = m/n,$$

где  $n$  - общее число проверяемых изделий (объем выборки), а  $m$  число дефектных изделий в выборке. Тогда гипотезу  $H_0$  необходимо принимать, если  $q^* \leq q_0$ , а отвергать, если

$q^* > q_0$ . Предположим, что реальная доля брака в партии равна  $q_0$ , т.е. это партия хорошего качества и по результатам контроля она должна приниматься.

Но, поскольку число дефектных изделий, попавших в выборку, является величиной случайной, то и конкретное значение  $q^*$ , полученное в результате контроля будет случайным. Его можно считать реализацией некоторой случайной величины  $Q^*$ . На рис. 12.1,а изображен примерный вид функции плотности вероятности  $f(Q^*)$  для этого случая. Очевидно, что при таком подходе половина из проверяемых партий будет забракована, т.е. риск поставщика составит недопустимую величину в 50 %.

С другой стороны, если предположить, что в партии изделий плохого качества реальная доля брака лишь незначительно превышает  $q_0$ , можно видеть, что и риски заказчика при таком плане контроля приближаются к 50 % (рис. 12.1,б).

Чтобы сохранить риски поставщика и заказчика на заданном малом уровне при статистическом контроле вводятся два значения:  $q_0$  - приемочный уровень качества и  $q_1$  - браковочный уровень качества и тогда гипотеза  $H_0$  принимает вид  $q \leq q_0$ , а гипотеза  $H_1$  -  $q^* \geq q_1$ .

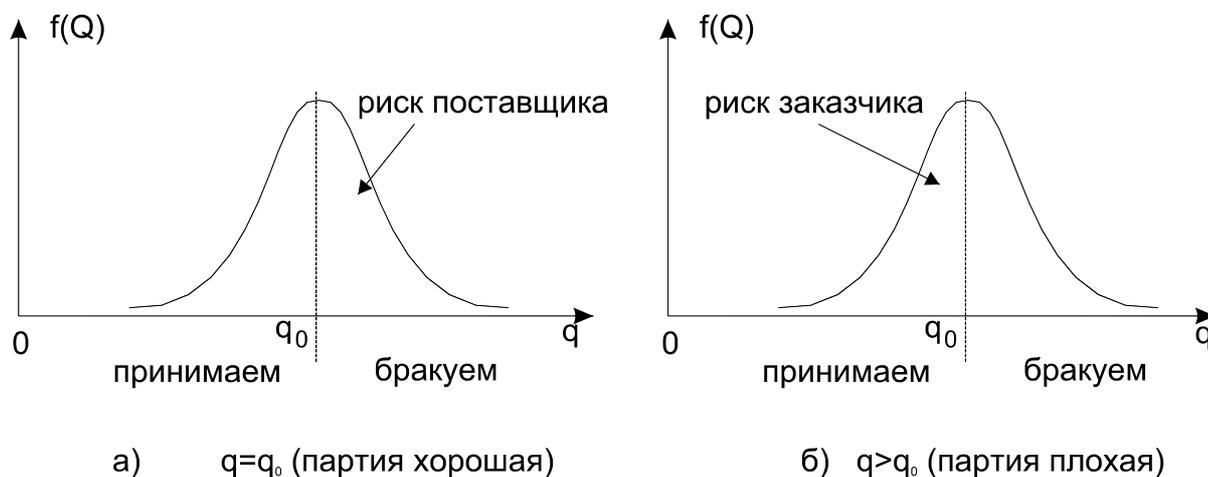


Рис. 12.1. Плотность вероятности доли дефектных изделий

### 12.2.5. Исходные данные для разработки плана контроля

Таким образом, для разработки плана выборочного контроля необходимо задать допустимые риски поставщика и заказчика, а также приемочный и браковочный уровни качества. Эти значения определяются чисто экономическими соображениями и являются предметом договора между потребителем и изготовителем.

*План контроля должен определять количество проверяемых изделий (объем выборки), а также методику обработки результатов проверки (правила приемки или браковки), обеспечивая риски поставщика и заказчика не выше заданных при любом качестве партии.*

### 12.3. Принцип построения плана выборочного контроля

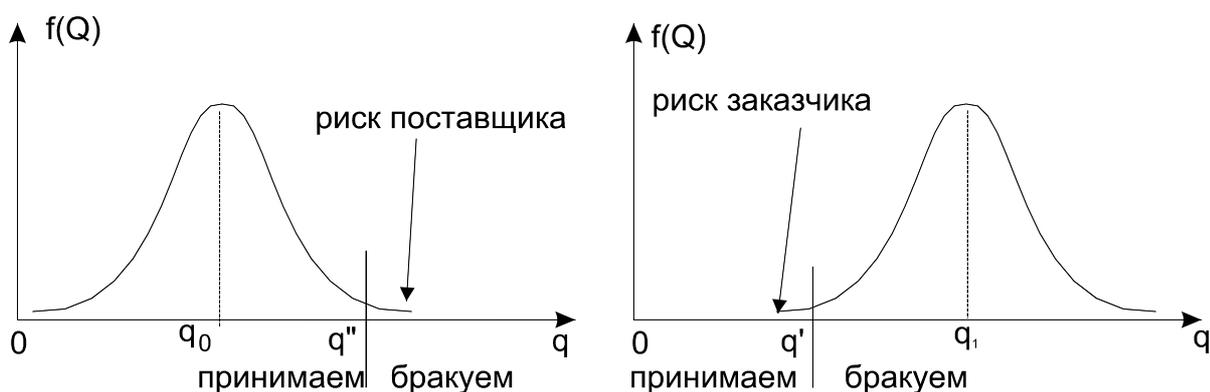
Для того, чтобы разобраться как строится план контроля предположим, что в проверяемых партиях доля дефектных изделий равна  $q_0$ , т.е. это партии хорошего качества и они должны преимущественно приниматься, а браковаться с вероятностью, не превышающей допустимый заданный уровень.

На рис. 12.2,а сплошной кривой показан вид функции плотности вероятности случайной величины  $Q^*$  (доли дефектных изделий в выборке объема  $n$ ) для этого случая. Очевидно, что для обеспечения риска изготовителя на заданном уровне необходимо

браковать только те партии, при проверке которых доля дефектных изделий в выборке оказалась выше значения  $q''$  ( $q^* > q''$ ).

На рис. 12.2,б рассмотрена аналогичная ситуация для партий плохого качества с долей дефектных изделий равных  $q_1$ , которые должны преимущественно браковаться, а приниматься с вероятностью, не превышающей заданный уровень риска потребителя. Очевидно, что выполнить это можно, если в качестве условия приемки партии выбрать  $q^* \leq q'$ .

Таким образом, если при проверке доля дефектных изделий в выборке оказалась меньше или равна  $q'$ , то такая партия изделий должна приниматься, если больше  $q''$  - браковаться. Если же доля дефектных изделий в выборке находится в интервале  $[q', q'']$ , то принять или забраковать партию нельзя, так как риски поставщика и потребителя при этом могут оказаться выше заданных.



а)  $q < q_0$  (партия хорошая)

б)  $q > q_1$  (партия плохая)

Рис. 12.2. Определение границ приемки и браковки партий

Уменьшить величину этого интервала неопределенности можно, увеличивая объем выборки. На рис.12.2. пунктиром показан вид функции плотности вероятности доли дефектных изделий в выборке объема  $n_1 > n$ .

Наиболее известными планами контроля являются однократная и двукратная выборка, последовательный контроль.

#### 12.4. Контроль качества методом однократной выборки

При контроле по методу однократной выборки из партии изделий случайным образом отбирается  $n$  штук, которые подвергаются проверке. Если количество обнаруженных дефектных изделий превышает некоторое *приемочное число*  $C$ , то партия бракуется, если нет - партия принимается.

Объем выборки  $n$  выбирается таким, чтобы величина интервала неопределенности  $[q', q'']$  была равна нулю, т.е.  $q' = q''$ . Тогда приемочное число  $C = nq'$ .

Для расчета объема выборки и приемочного числа необходимо знать вид распределения доли дефектных изделий в выборке  $Q^*$ . Очевидно, что эта случайная величина тесно связана с другой случайной величиной, а именно числом дефектных изделий  $R$ , попавших в выборку. Распределение этой дискретной случайной величины известно и определяется соотношением, показывающим вероятность попадания в выборку объема  $n$  ровно  $r$  дефектных изделий из партии объема  $N$ , содержащей  $M$  дефектных изделий

$$P\{R=r\} = \frac{C_M^r C_{N-M}^{n-r}}{C_N^n}.$$

Это так называемое гипергеометрическое распределение. Здесь запись  $C_M^r$  (читается - "с" из "М" по "r") показывает, какое количество всевозможных сочетаний, состоящих из  $r$

элементов в каждом, можно составить из  $M$  элементов. Оно справедливо для всех случаев, реально встречающихся на практике, но, к сожалению, неудобно для расчетов. Для построения планов контроля его заменяют на более простые распределения, справедливые при некоторых ограничениях. Так, например, если объем выборки мал по сравнению с объемом партии, то его можно аппроксимировать биномиальным распределением, имеющим следующий вид

$$P\{R=r\} = C_n^r q^r (1-q)^{n-r}.$$

Еще более простое соотношение можно использовать, если  $n > 40$ , а доля дефектных изделий в партии не превышает 10% ( $q < 0,1$ )

$$P\{R=r\} = \frac{(nq)^r}{r!} \cdot \exp(-nq).$$

Это так называемое распределение Пуассона.

Поскольку необходимо обеспечить заданные риски поставщика  $\alpha'$  и заказчика  $\beta'$ , объем выборки  $n$  и приемочное число  $C$  должны быть такими, чтобы выполнялись соотношения

$$\sum_{r=C+1}^{\infty} P\{R=r\} \leq \alpha' P\{R=r\}, \text{ при } q=q_0$$

и

$$\sum_{r=0}^C P\{R=r\} \leq \beta', \text{ при } q=q_1,$$

т.е. вероятность попадания в выборку из партии хорошего качества количества бракованных изделий превышающего приемочное число не должна быть больше риска поставщика (первое соотношение) и вероятность попадания в выборку из партии плохого качества количества дефектных изделий меньших приемочного числа не должна быть больше риска заказчика (второе соотношение).

Приведенные выражения неудобны для практических расчетов, но оказывается, что если случайная величина  $R$  описывается распределением Пуассона, то суммы входящие в них хорошо аппроксимируются распределением Пирсона, так что можно записать

$$F_{\chi^2} (2C+2)(2q_0n) \leq \alpha',$$

$$F_{\chi^2} (2C+2)(2q_1n) \leq \beta'.$$

Здесь  $(2C+2)$  означает число степеней свободы для функции распределения Пирсона или как его часто называют "распределение хи-квадрат" -  $\chi^2$ . Для планирования испытаний последние соотношения приводятся к следующему виду

$$\frac{\chi_{\beta'}^2(2r+2)}{\chi_{1-\alpha'}^2(2r+2)} \leq q_1/q_0,$$

где  $\chi_{\beta'}^2(2r+2)$  - квантиль распределения Пирсона уровня  $\beta'$  с  $2r+2$  степенями свободы. Распределение Пирсона используется часто и в любой книге по математической статистике есть таблицы с квантилями этого распределения.

Подставляя в это выражение последовательно  $r=0,1,2,\dots$ , находят такое минимальное число, для которого это неравенство будет выполняться. Это и будет приемочным числом  $C$ . После этого рассчитывается объем выборки

$$n = \frac{\chi_{1-\alpha'}^2(2C+2)}{2q_1}.$$

### 12.5. Литература по теме

12.1. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика/ Учеб. для вузов. - М.: Высшая школа

12.2. Ефремов Г.С., Забегалов Б.Д. Теоретические основы статистического контроля качества и испытаний РЭА/ Учеб. пос. для вузов.- Горький, ГПИ им. А.А. Жданова, 1977.

### 12.6. Вопросы для самопроверки

1. *Обоснуйте необходимость выборочного контроля качества.*
2. *Что называется случайной выборкой?*
3. *Что такое статистическая гипотеза и как она проверяется? Какие бывают гипотезы?*
4. *Дайте определение рисков поставщика и заказчика, приемочного и браковочного уровня качества. Как определяются области приемки и браковки партий изделий?*
5. *Как строится план контроля по методу однократной выборки?*
6. *Какими распределениями описывается число дефектных изделий в выборке?*

## **ЛЕКЦИЯ 13. НАДЕЖНОСТЬ РЭС И МЕТОДЫ ЕЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

*Основные термины и определени:* Надежность. Работоспособность. Отказ. Нарботка. Безотказность. Долговечность. Ресурс.

*Выбор основного показателя надежности:* Неоднозначность выбора. Экономический подход.

*Назначение норм надежности:* Использование прототипа. Расчет показателей.

*Резервирование:* Цель и классификация. Виды включения. Активный и пассивный резерв.

### **13.1. Основные термины и определения**

**В**се промышленные изделия характеризуются качеством, т.е. совокупностью свойств, которые существенно отличают данное изделие от других и определяют степень его пригодности для эксплуатации по назначению. Одним из главнейших показателей качества РЭС является надежность.

*Под надежностью понимают свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течении требуемого промежутка времени или требуемой наработки при соблюдении режимов эксплуатации, правил технического обслуживания, хранения и транспортирования.*

Надежность - это сложное комплексное понятие, включающее такие важнейшие характеристики изделий, как работоспособность, долговечность, безотказность, ремонтпригодность, восстанавливаемость.

В связи со сложностью содержания понятия надежности ее невозможно точно рассчитать; можно лишь приближенно оценить для созданных ранее устройств и приближенно прогнозировать для вновь создаваемых.

Определим важнейшие характеристики надежности РЭС. Заметим, что термины в области надежности изделий являются общими для различных отраслей промышленности. Работоспособность - состояние изделия, при котором, оно способно выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями технической документации. Под параметрами изделия понимают его производительность, точность, рентабельность, экономичность и др.

В теории надежности широкое распространение получило понятие отказ, под которым подразумевают случайное событие, заключающееся в нарушении работоспособности изделия. Различают внезапные и постепенные отказы.

Внезапными (мгновенными) отказами называются такие, которые возникают в результате мгновенного скачкообразного изменения одного или нескольких параметров изделия.

Постепенные отказы - такие, при которых происходит постепенное изменение главных параметров вследствие износа или старения изделия.

По внешним проявлениям отказы делятся на явные и неявные. Первые могут быть обнаружены визуально (например, обрыв печатных проводников), вторые - только с помощью специальных измерений.

По характеру устранения отказов они делятся на устойчивые и самоустраняющиеся. Самоустраняющиеся отказы проявляются в виде сбоя или перемежающегося отказа (вызванного, например, плохим контактом в соединителе). Естественно, что не все неисправности являются отказами. Те из них, при которых изделие сохраняет работоспособность, называются дефектами.

Нарботка - продолжительность (или объем) работы изделия, измеряемая временем, циклами, периодами и т.п. Под наработкой на отказ понимают среднее значение наработки ремонтируемого изделия между отказами. Если наработка выражена в единицах времени, то используют термин среднее время безотказной работы.

Под средней наработкой до первого отказа понимают среднее значение наработки изделий в партии до первого отказа. Для неремонтируемых изделий этот термин равнозначен

понятию средней наработки до отказа. *Гарантийная наработка* представляет собой наработку изделия, до завершения которой изготовитель гарантирует и обеспечивает выполнение определенных требований к изделию, при условии соблюдения потребителем правил эксплуатации, в том числе правил хранения и транспортирования. Срок гарантии устанавливается в технической документации или в договорах между изготовителем и заказчиком.

*Безотказность* называют свойство изделия сохранять свою работоспособность в течение некоторой наработки без вынужденных перерывов. Безотказность измеряется в единицах наработки. Для неремонтируемой аппаратуры в качестве показателей безотказности используют *интенсивность отказов* и *время безотказной работы*. Для ремонтируемых изделий за аналогичные показатели выбирают *наработку на отказ*, *параметр потока отказов* или *вероятность безотказной работы*.

Под *интенсивность отказов* понимают вероятность отказа неремонтируемого изделия в единицу времени при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не наступил. Под *вероятностью безотказной работы* понимают вероятность того, что в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки отказ не произойдет. *Параметр потока отказов* характеризуется средним количеством отказов ремонтируемой аппаратуры в единицу времени.

*Долговечность* определяется свойством изделия длительно сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для профилактического обслуживания и ремонта.

Под *ресурсом* понимают величину наработки изделия вплоть до его предельного состояния. В практике различают ресурс до первого ремонта, межремонтный, назначенный, гамма-процентный и средний.

Ресурс изделия до первого ремонта характеризуется его наработкой, после которой необходимо выполнить ремонт. Назначенный ресурс характеризуется наработкой, оговоренной в технической документации на изделие, по истечении которой его эксплуатация должна быть прекращена независимо от состояния изделия. Гамма-процентный ресурс - это тот, который равен или превышает в среднем заранее заданный процент изделий, не вышедших из строя при испытаниях. Например, если он равен 5%, то не менее 95 изделий из 100 из выпущенной партии обладают назначенным ресурсом.

### 13.2. Выбор основного показателя надежности

При составлении технического задания на разработку обычно один из возможных показателей надежности выбирается в качестве основного, наиболее полно характеризующего проектируемую систему. Поступают так потому, что сравнение различных вариантов изделия по нескольким показателям надежности часто приводит к противоречивым выводам. Так, может оказаться, что один из вариантов имеет большую среднюю наработку до отказа, другой большую вероятность безотказной работы.

Выбор и назначение основного параметра надежности не является прерогативой только теории надежности как таковой. Важнейшими обстоятельствами при выборе основного показателя надежности являются назначение РЭС, предъявляемые к ней требования и учет последствий, к которым может привести отказ РЭС. Последствия отказа классифицируются следующим образом:

- отказ приводит к невыполнению задания;
- отказ приводит к простоя системы;
- отказ приводит к ущербу.

Так, например, для РЭС размещаемых на искусственных спутниках Земли, определяющим показателем является среднее время безотказной работы, поскольку такая аппаратура относится к классу неремонтируемой в процессе эксплуатации и рассчитывается на длительный срок службы.

В /13.2/ основным показателем надежности рекомендуется считать показатель, который входит в формулу для эффективности функционирования изделия. Рассмотрим использование такого подхода на примере выбора основного показателя для оборудования автоматической метеостанции. Очевидно, что "доход"  $D$  от работы такой станции пропорционален времени ее работы  $t$ . При отказе станции имеем "ущерб"  $Y_1$ , связанный с потерей информации и "ущерб"  $Y_2$ , связанный с ремонтом или заменой станции. С учетом последствий отказа общая "доходность" системы определится следующим образом

$$D(t) = D_0 \cdot t - Y_1 - Y_2,$$

где  $D_0$  - "доход" от работы станции в единицу времени. Для каждой из станций величина  $D(t)$  будет иметь свое значение, поскольку отказы станций происходят по случайному закону. "Средний доход" от работы группы проектируемых станций определится как математическое ожидание  $M(D)$  случайной величины  $D(t)$ . Используя известные из математической статистики формулы, получим

$$\int_0^{\infty} D(t) f(t) dt = D_0 \int_0^{\infty} t \times f(t) dt - Y_1 - Y_2.$$

Средние значения  $D_0$ ,  $Y_1$  и  $Y_2$  не связаны с безотказной работой, следовательно, основным показателем надежности для метеостанции является средняя наработка на отказ

$$R = \int_0^{\infty} t \times f(t) dt = m_t.$$

Общие рекомендации при выборе основного показателя надежности сводятся к следующему:

- если для создаваемых изделий определяющим является выполнение возложенных на нее функций, то за основной показатель надежности принимают вероятность безотказной работы;
- если определяющим является минимум простоев, то за основной показатель надежности принимают среднее время пребывания РЭС в работоспособном состоянии в течении срока службы;
- если прежде всего необходимо предотвратить ущерб в результате отказа системы, то основным показателем целесообразно выбрать среднее время наработки на отказ. Заметим, что эти рекомендации не следует рассматривать как безусловные.

*К выбору основного показателя надежности проектируемой аппаратуры следует подходить с особой тщательностью, так как он во многом определяет последующие конструкторские решения.*

### **13.3. Назначение норм надежности**

Численные значения показателей надежности назначают на этапе составления технического задания или эскизного проекта, когда еще не вполне ясны конструктивные формы будущего изделия. Поэтому обоснованно назначить нормы надежности для всего изделия и его составных частей, можно только пользуясь априорной информацией о достигнутых показателях надежности в прототипах. В качестве прототипа выбирают объект, аналогичный разрабатываемому по назначению и принципу действия. Нормы его надежности выбирают за исходные и уточняют для разрабатываемой системы с учетом предъявляемых к ней требований, условий эксплуатации, профилактического обслуживания и ремонта (если таковые допускаются), квалификации обслуживающего персонала, уровней технической оснащенности и технологии производства предприятия-изготовителя.

Если прототипа не существует, то нормы надежности просто назначают (основываясь на накопленном опыте), а затем на основании упрощенных расчетов проверяют их правомерность и практическую реализуемость. Эти расчеты основаны на следующих допущениях:

- вероятность возникновения отказов не зависит от времени и подчиняется экспоненциальному закону;
- все элементы системы равнонадежны.

Исходными данными для расчета являются:

- требуемые вероятность безотказной работы РЭС  $P_c(t)$  и среднее время ее работы  $t_c$ ;
- допустимая интенсивность отказов в системе  $\alpha_c$  и количество компонентов, включаемых в расчет  $N$ .

В зависимости от детализации, с которой проводят расчет, в качестве компонентов расчета надежности принимают отдельные части РЭА, ее блоки, узлы, элементы и пр. Очевидно, что при равнонадежных компонентах для обеспечения вероятности безотказной работы всей системы равной  $P_c$  необходимо, чтобы вероятность безотказной работы каждого компонента расчета была не менее

$$p_i(t) = \sqrt[N]{P_c(t)},$$

или при экспоненциальном законе распределения

$$\alpha_i = \alpha_c / N.$$

Величина  $\alpha_i$  является приближенной, но она позволяет не только выбрать конкретные элементы РЭС, но и оценить принципиальную возможность создания структурно более сложных и крупных систем без каких-либо дополнительных средств по увеличению их надежности.

Проиллюстрируем методику назначения норм надежности на следующем примере. Запланировано, что некоторое устройство конструктивно будет выполнено в виде двух блоков, один из которых содержит 50 ИС, а второй - 100 ИС. Требуемая вероятность безотказной работы всего устройства в течение 1000 часов должна быть не менее 0,99. Необходимо установить нормы надежности на ИС в виде допустимой интенсивности отказов и блоки в виде вероятности безотказной работы. Решение задачи проводим в следующей последовательности:

- определяем общее число компонент надежности  $N$

$$N = 50 + 100 = 150;$$

- полагая, что  $P_c(t) = \exp(-\alpha_c t)$ , определим допустимую интенсивность отказов в системе

$$\alpha_c = -\ln P_c(t)/t = -\ln 0,99/1000 = 10^{-5} \text{ час}^{-1}.$$

Следовательно, для каждой ИС интенсивность отказов должна быть не выше

$$\alpha_i = \alpha_c / N = 10^{-5}/150 = 6,710^{-8} \text{ час}^{-1}.$$

Вероятность безотказной работы блоков будет соответственно равна

$$p_1(t) = \exp(-\alpha_i N_1 t) = \exp(-6,7 \cdot 10^{-8} \cdot 50 \cdot 1000) = 0,997,$$

$$p_2(t) = \exp(-\alpha_i N_2 t) = \exp(-6,7 \cdot 10^{-8} \cdot 100 \cdot 1000) = 0,993.$$

### 13.4. Резервирование

Резервированием называется введение в техническое устройство дополнительного числа компонентов и связей по сравнению с минимально необходимым для его нормального функционирования. Цель резервирования - повысить надежность изделий. Резервирование бывает общее, поэлементное и смешанное.

При общем резервировании резервируется все изделие, т.е. в случае выхода из строя оно заменяется таким же. При поэлементном резервировании дублируются отдельные части изделия (поэлементно, поблочно и т.п.), и в случае отказов они также заменяются идентичными. При смешанном резервировании крупные и наиболее ответственные функциональные части изделия имеют общее резервирование, остальные - поэлементное.

Перечисленные виды резервирования относятся к схемной избыточности, называемой структурным резервированием.

По способу введения резерва различают постоянное включение, включение замещением и скользящее.

*Постоянное включение* характеризуется тем, что все резервные элементы включены постоянно и находятся в рабочем состоянии в течение всего времени работы основных элементов. Резервные элементы обладают свойством компенсации отказов отдельных частей устройства и обеспечивают его надежную работу. Постоянное резервирование эффективно только в том случае, если возникающие в РЭС отказы являются статистически независимыми, т.е. не влияют друг на друга. Поскольку, в этом случае отказы основных элементов сразу устраняются, и работоспособность изделия не нарушается, то нет необходимости в поиске отказавших элементов. Постоянное резервирование получило наибольшее распространение в неремонтируемых изделиях особенно в тех случаях, когда по условиям эксплуатации недопустим даже кратковременный перерыв в работе.

*Включение замещением* характеризуется тем, что при отказах одного элемента (узла, блока и т.п.) вместо него включается резервный, в результате чего изделие вновь продолжает нормально функционировать. Подключению исправного узла вместо вышедшего из строя предшествует обнаружение последнего. При этом поиск неисправности и замещение отказавшего узла может быть осуществлено вручную или автоматически. Резервирование замещением позволяет иметь один резервный узел на несколько основных.

*Скользящее включение* резервных элементов применимо лишь в случае, когда изделие состоит из однотипных элементов. Оно характеризуется тем, что любой резервный элемент может заменять любой основной, вышедший из строя. Для осуществления скользящего резервирования необходимо иметь автоматическое устройство для нахождения неисправного элемента и подключения вместо него резервного. Преимуществом такого резервирования по отношению к остальным перечисленным является наибольший выигрыш в надежности.

Резервирование бывает активным и пассивным. *Активным резервированием* называют такое, при котором отказавший функциональный элемент заменяется резервным. При этом в зависимости от режимов работы резервных элементов различают нагруженный (горячий), облегченный и ненагруженный (холодный) резервы.

*Нагруженный резерв* характеризуется тем, что условия работы резервных изделий полностью совпадают с условиями работы основных изделий, которые они замещают в случае отказа. Таким образом, имеет место постоянное резервирование и ресурс резерва расходуется одновременно и в равной мере с ресурсом основного изделия.

*Облегченный резерв* характеризуется тем, что условия работы резервных элементов облегчены до момента их включения, в силу чего их ресурс расходуется лишь частично. Уровень нагруженности резервных элементов определяется из условий конкретной задачи.

*Ненагруженный резерв* характеризуется тем, что резервное изделие отключено (находится в состоянии готовности) и включается только после выхода из строя основного изделия. Его ресурс в этом случае не расходуется.

*Пассивным резервированием* называется такое, при котором отказ одного или нескольких элементов системы не влияет на ее работоспособность. Такое резервирование характеризуется постоянным включением элементов в схему, и в случае отказа одного из них переключение в схеме (как и при активном резервировании не происходит).

При пассивном резервировании различают резервирование с неизменной и с перераспределенной нагрузками. *Резервирование с неизменной нагрузкой* характеризуется тем, что при отказе одного или нескольких элементов системы нагрузка на оставшиеся работоспособные элементы остается неизменной. *Резервирование с перераспределением нагрузки* имеет место, когда при отказе одного или нескольких элементов системы нагрузка на работоспособные ее элементы соответственно возрастает.

### **13.5. Литература по теме**

13.1. Яншин А.А. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности ЭВА: Учеб. пос. для вузов.- М.: Радио и связь, 1983 г. -312 с.

13.2. Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах: Учеб. пос. для вузов/ Под ред. Г.В. Дружинина.- М.: Энергия 1,976 г. – 448 с.

## **ЛЕКЦИЯ 14. ОСОБЕННОСТИ РЭС КАК ОБЪЕКТА ПРОИЗВОДСТВА**

**Введение:** Конструирование и технология. Технологичность.

**Производственный и технологический процесс:** Определения. Технологическая операция и ее составляющие: установки, позиции, переходы, приемы. Типы производства. Коэффициент закрепления операций. Единичное, массовое и серийное производства.

**Особенности РЭС в производстве:** Разнородность ТП. Высокая трудоемкость сборки и контроля.

**Технологическая подготовка производства:** Основные задачи. Понятие о ЕСТПП. Виды ТП: единичный, типовой, групповой.

**Технологическая документация:** ЕСТД. Маршрутная карта. Карта ТП. Операционная карта. Карта типового ТП.

### **14.1. Введение**

Для того чтобы быть востребованной потребителем, конструкция РЭС должна быть изготовлена в процессе производства. Естественно, что особенности конструкции оказывают влияние на организацию и структуру производственного процесса. Так, например, производство изделий СВЧ значительно отличается от производства низкочастотной аппаратуры. Вместе с тем конструкция любого изделия будет максимально конкурентоспособной, если она учитывает и использует особенности уже существующего налаженного производства, иначе говоря, если конструкция обладает *производственной технологичностью*, т.е. приспособленностью к ограниченному расходованию трудовых, материальных и энергетических ресурсов.

Технологичность – понятие относительное, рассматриваемое применительно к конкретному предприятию. Она включает в себя материальные и трудовые затраты, связанные как с подготовкой производства конкретного изделия, так и непосредственно с самим производством. Чем больше в конструкцию включено уже освоенных, типовых, стандартных или заимствованных деталей и узлов, тем меньше времени займет перепрофилирование производства и тем выше ее технологичность.

**В процессе проектирования РЭС всегда необходимо помнить, что схемотехника, конструкция и технология РЭС тесно связаны и взаимообусловлены.**

### **14.2. Производственный и технологический процесс**

*Производственный процесс* представляет собой совокупность всех действий людей и орудий производства, необходимых на данном предприятии для изготовления или ремонта выпускаемых изделий РЭС. В состав производственного процесса входят все действия по изготовлению, сборке, контролю качества, выпускаемых изделий; хранению и перемещению его деталей, полуфабрикатов и сборочных единиц на всех стадиях изготовления; организации снабжения и обслуживания рабочих мест, участков и цехов; управлению всеми звеньями производства, а также комплекс мероприятий по технологической подготовке производства.

*Технологический процесс (ТП)* - это часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда.

Технологические процессы строят по отдельным методам их выполнения (процессы литья, механической и термической обработки, покрытий, сборки, монтажа и контроля и т.д.) и разделяют на операции.

*Технологическая операция* - это законченная часть ТП, выполняемая непрерывно на одном рабочем месте, над одним или несколькими одновременно изготавливаемыми или собираемыми изделиями одним или несколькими рабочими. Условие непрерывности операции означает выполнение предусмотренной ей работы без перехода к изготовлению или сборке изделия. Например, подготовка ленточных кабелей к монтажу включает в себя мерную резку, удаление изоляции с определенных участков провода, нанесение покрытия на

оголенные токоведущие жилы (залуживание). Таким образом, состав операции устанавливается не только на основе технологических соображений, но и с учетом организационной целесообразности.

Технологическая операция является основной единицей производственного планирования и учета. На основе операций оценивается трудоемкость изготовления изделий и устанавливаются нормы времени и расценки; определяется требуемое количество рабочих, оборудования, приспособлений и инструментов, себестоимость изготовления (сборки); ведется календарное планирование производства и осуществляется контроль качества и сроков выполнения работ.

Кроме основных технологических операций в состав ТП включают ряд необходимых для его осуществления вспомогательных операций (транспортных, контрольных, маркировочных и т.п.).

Технологические операции подразделяют на установы, позиции, переходы, приемы.

*Установ* - представляет собой часть технологической операции, выполняемую при неизменном закреплении обрабатываемых заготовок или собираемой сборочной единицы.

*Позиция* - часть операции, выполняемая при неизменном положении инструмента относительно детали.

*Технологический переход* - законченная часть технологической операции, характеризующаяся постоянством режимов применяемых инструментов и поверхностей, образуемых обработкой или соединяемых при сборке.

*Прием* - это законченная совокупность действий человека, применяемых при выполнении перехода или его части и объединенных одним целевым назначением.

### 14.3. Типы производства

В зависимости от номенклатуры, регулярности, стабильности и объема выпускаемых изделий современное производство подразделяется на единичное, серийное и массовое. Различные типы производства отличаются, в частности, такой важной характеристикой, как коэффициент закрепления операций

$$Kз.о. = O/P,$$

где  $O$  - число различных технологических операций, выполненных или подлежащих выполнению в течение месяца;  $P$  - число рабочих мест.

*Единичное производство* характеризуется широкой номенклатурой и малым объемом выпуска изделий. Количество различных заготовок, поступающих на одно рабочее место, исчисляется штуками и десятками штук; на рабочих местах выполняются разнообразные технологические операции, повторяющиеся нерегулярно или вовсе неповторяющиеся; используется универсальное точное оборудование; специальные инструменты и приспособления, как правило, не применяются; взаимозаменяемость деталей и узлов во многих случаях отсутствует, широко используется подгонка по месту; квалификация рабочих очень высокая, так как от нее напрямую зависит качество продукции. Себестоимость выпускаемых изделий при этом получается очень большой. Коэффициент закрепления операций для единичного производства не нормируется.

*Массовое производство* характеризуется узкой номенклатурой и большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых в течение продолжительного времени. За каждым рабочим местом закрепляется одна постоянно повторяющаяся операция ( $Kз.о. = 1$ ). При этом используется специальное высокопроизводительное оборудование, которое расставляется по ходу технологического процесса и связывается транспортирующими устройствами и конвейерами с постами промежуточного автоматического контроля. Широко применяются автоматические линии и автоматизированные производства, управляемые от ЭВМ. Требуемая точность достигается методами автоматического получения размеров на настроенных станках. Обеспечивается полная взаимозаменяемость деталей и узлов и только в отдельных случаях применяется селективная сборка, обеспечивающая групповую

взаимозаменяемость. Средняя квалификация рабочих в современном массовом производстве ниже, чем в единичном, так как на настроенных станках и автоматическом оборудовании могут работать рабочие-операторы сравнительно низкой квалификации.

*Серийное производство* характеризуется ограниченной номенклатурой изделий, изготавливаемых периодически повторяющимися партиями и сравнительно большим объемом выпуска. В зависимости от количества изделий в партии или серии и значения коэффициента закрепления операций за рабочим местом различают *мелкосерийное* (Кз.о. =20...40), *среднесерийное* (Кз.о. =10...20) и *крупносерийное* (Кз.о. <10) производство.

Объем выпуска предприятия серийного типа колеблется от десятков и сотен до тысяч регулярно повторяющихся изделий. При этом в производстве используется универсальное и специализированное оборудование, которое расставляется по технологическим группам с учетом направления основных грузопотоков цеха по предметно-замкнутым участкам. Технологическая оснастка в основном универсальная, хотя в крупносерийном производстве может использоваться и специальная высокопроизводительная оснастка. Требуемая точность достигается как методами автоматического получения размеров, так и методами пробных ходов и промеров с частичным применением разметки. Средняя квалификация рабочих ниже чем в единичном производстве, но выше чем в массовом, так как наряду с рабочими-операторами используются рабочие высокой квалификации для работы на сложном универсальном оборудовании. В зависимости от объема выпуска и особенности изделий обеспечивается полная взаимозаменяемость и неполная, групповая взаимозаменяемость сборочных единиц. В ряде случаев может использоваться компенсация размеров и пригонка по месту.

#### 14.4. Особенности РЭС в производстве

В производстве элементов, сборочных единиц и устройств РЭС используется большой перечень технологических процессов, основанных на различных механических, физических и химических методах обработки разнообразных материалов. Так, например, производство печатных плат основано на химическом (субтрактивном), аддитивном, электрохимическом (полуаддитивном) и комбинированном методах изготовления. Они различаются способами получения рисунка печатного монтажа и токопроводящего слоя. Промышленное применение нашли сеткографический и фотолитографический способы формирования рисунка. Проводящий слой получают травлением, химическим или химико-гальваническим наращиванием. Для этих методов характерны следующие типовые технологические операции: механическая обработка, нанесение рисунка, травление, химическое или химико-гальваническое осаждение меди, удаление защитной маски. Производство сборочных единиц и модулей РЭС основано на сборке и электрическом монтаже, причем монтаж является более трудоемким. Электромонтажные работы по получению контактных соединений выполняют различными методами: пайкой, сваркой, склеиванием, накруткой, механическим контактированием, а также электрическим монтажом (печатным, жгутовым, проводным на платах, плоскими кабелями и т.д.). Механическое контактирование модулей третьего и четвертого уровней осуществляется с помощью электрических соединителей.

В производстве РЭС они являются комплектующими изделиями, а технология их изготовления построена на типовых операциях холодной листовой штамповки, переработки пластмасс, механической и химической обработки. Производство полупроводниковых ИС базируется на процессах диффузии, ионного легирования, эпитаксии, пассивации, а производство гибридных тонкопленочных микросхем на процессах термического и вакуумного распыления с помощью ионной бомбардировки.

Особенностью РЭС является также высокая трудоемкость сборочных и монтажных работ, что объясняется наличием большого числа соединений и сложностью их выполнения вследствие малых размеров и высокой плотности монтажа.

Еще одной особенностью производства РЭС является большая трудоемкость контрольных и регулировочных операций. На отдельных предприятиях число контролеров достигает 30...40 % от общего числа рабочих.

### 14.5. Технологическая подготовка производства

Технологическая подготовка производства (ТПП) представляет совокупность мероприятий, обеспечивающих готовность предприятия к выпуску изделия. Под полной технологической готовностью понимается наличие на предприятии всей конструкторской и технологической документации и средств технологического оснащения, необходимых для осуществления заданного объема выпуска продукции с установленными технико-экономическими показателями.

Организация и управление технологической подготовкой производства осуществляется в соответствии с Единой Системой Технологической Подготовки Производства (ЕСТПП), предусматривающей широкое применение прогрессивных типовых технологических процессов, стандартной технологической оснастки и оборудования, средств механизации и автоматизации производственных процессов, инженерно-технических и управленческих работ.

Основное назначение ЕСТПП заключается в решении задач обеспечения технологичности конструкции; разработки технологических процессов; проектирования и изготовления средств технологического оснащения, организации и управления процессом технологической подготовки.

Одной из важнейших составных частей ТПП является проектирование технологических процессов. Обычно проектирование технологических процессов ведется по методике, определяемой разработчиком. Она зависит от его опыта и навыков, наличия справочных материалов и других причин. Даже при одинаковой квалификации исполнителей нет гарантии получения равноценных по качеству результатов. Использование средств вычислительной техники позволяет существенно ускорить процесс проектирования и улучшить его качество, поэтому в последнее время значительные усилия были направлены на разработку Автоматизированных Систем Подготовки Производства (АСТПП). Исходными данными для проектирования технологических процессов являются чертеж детали и общие виды изделий, спецификация всех деталей, монтажные и полумонтажные схемы (для сборки), технические условия на наиболее ответственные детали, сборочные единицы и изделия, размер производственного задания, руководящие технические материалы (данные об оборудовании, нормалы на инструмент, типовые технологические процессы и др.).

Различают три вида технологических процессов: единичный, типовой, групповой

*Единичный ТП* разрабатывается для изготовления и ремонта изделия одного наименования, типоразмера и исполнения независимо от типа производства. Разработка единичного ТП включает в себя следующие этапы:

- анализ исходных данных и выбор действующего типового, группового ТП или аналога единичного процесса;
- выбор исходной заготовки и метода ее получения;
- определение содержания операций, выбор технологических баз и составление технологического маршрута (последовательности) обработки;
- выбор технологического оборудования, оснастки, средств автоматизации и механизации технологического процесса. Уточнение последовательности выполнения переходов;
- назначение и расчет режимов выполнения операции, нормирование переходов и операции ТП, определение профессий и квалификации исполнителей, установление требований к технике безопасности;

- расчет точности, производительности и экономической эффективности ТП. Выбор оптимального процесса;
- оформление рабочей технологической документации.

Необходимость каждого этапа, состава задач и последовательности решения устанавливается в зависимости от типа производства. Типизация технологических процессов позволяет устранить их многообразие с обоснованным сведением к ограниченному числу типов.

*Типовой технологический процесс* характеризуется единством содержания и последовательности большинства технологических операций и переходов для групп изделий с общими конструктивными признаками. Типизацию начинают с классификации изделий. Классом называют совокупность деталей, характеризуемых общностью технологических задач. В пределах класса детали разбивают на группы, подгруппы и т. д. до типа. Практически к одному типу относят детали, для которых можно составить один технологический процесс.

При изготовлении РЭС широко применяют типовые технологические процессы изготовления гибридных и полупроводниковых микросхем, печатных плат, типовых элементов замены ячеек и т.д.

*Групповой технологический процесс* предназначен для совместного изготовления или ремонта групп изделий с разными конструктивными, но общими технологическими признаками. При группировании одна из наиболее сложных деталей принимается за комплексную. Эта деталь должна иметь все поверхности, встречающиеся у деталей данной группы. Они могут быть расположены в иной последовательности, чем у комплексной детали. При отсутствии такой детали в группе создается условная комплексная деталь. Групповые технологические операции и схемы настройки станка разрабатываются для комплексной детали. По этому технологическому процессу можно обрабатывать любую деталь группы без значительных отклонений от общей схемы. Если при обработке какой-либо детали не требуется весь комплект инструментов, то пользуются только необходимым, пропуская ненужный. В отдельных случаях возможна замена одного инструмента другим и небольшие подналадки станка. Групповые технологические процессы используют для механической обработки деталей на универсальном оборудовании, для электромонтажных, сборочных и других операций, что делает целесообразным применение высокопроизводительных автоматов и полуавтоматов в мелкосерийном производстве (например, для установки и пайки микросхем с планарными выводами на печатной плате).

#### **14.6. Технологическая документация**

Состав и правила выполнения технологической документации определяются Единой Системой Технологической Документации (ЕСТД). Она представляет собой комплекс государственных стандартов и руководящих нормативных документов, устанавливающих взаимосвязанные правила и положения по порядку разработки, комплектации, оформления и обращения технологической документации, применяемой при изготовлении и ремонте изделий (включая контроль, испытания и перемещения). Основное назначение стандартов ЕСТД заключается в установлении во всех организациях и на всех предприятиях единых правил выполнения, оформления, комплектации и обращения технологической документации в зависимости от типа и характера производства. Эти правила обеспечивают взаимообмен технологическими документами между организациями и предприятиями без их переоформления, а также стабильность комплектности, исключающую повторную разработку и выпуск дополнительных документов.

К технологическим относят графические и текстовые документы, которые определяют технологический процесс изготовления или ремонта изделия и содержат необходимые данные для организации производства. Состав документов зависит от стадии разработки технологического процесса, типа и характера производства. В условиях серийного и

массового производства используют следующие документы: карта эскизов (КЭ); технологическая инструкция (ТИ); карты - маршрутная (МК), технологического процесса (КТП), операционная (ОК), типового (группового) технологического процесса (КТПП), типовой (групповой) операции (КТО), технико-нормировочная (ТНК), наладки (КН); ведомость технологических маршрутов (ВТМ); ведомость деталей (сборочных единиц) к типовому (групповому) технологическому процессу (операции) (ВТП, ВТО). На стадиях проектирования (предварительного проекта и опытного образца) вид документа выбирается по усмотрению заказчика. Наиболее часто используется следующая документация.

Маршрутная карта является обязательным документом. Она устанавливает последовательность выполнения технологических, контрольных и транспортных операций при изготовлении конкретных деталей, сборке изделия и его упаковке. Кроме наименования операции и краткого изложения ее содержания, в маршрутной карте указывается номер технологического документа, в котором приведено подробное описание операции с указанием цеха и участка, где она выполняется, перечисляются детали, основные и вспомогательные материалы, нормы их расхода, применяемое оборудование, а также производственные разряды операторов, нормы времени изготовления 1000 изделий и расценки. Так как номенклатура применяемой технологической оснастки довольно обширна, в маршрутной карте ее обычно не указывают, а приводят в ведомостях оснастки и в ведомостях деталей к типовым технологическим операциям. Допускается взамен МК использовать соответствующую карту технологического процесса. Карта технологического процесса предназначена для операционного описания технологического процесса изготовления или ремонта изделия в технологической последовательности по всем операциям одного вида формообразования, обработки, сборки или ремонта, с указанием переходов, технологических режимов и данных о средствах технологического оснащения, материальных и трудовых затратах. Операционная карта содержит описание технологической операции с указанием переходов, режимов обработки и данных о средствах технологического оснащения. Она используется непосредственно на рабочем месте. Карта типового технологического процесса используется для описания типового технологического процесса изготовления или ремонта деталей или сборочных единиц, а карта типовой операции - для описания типовой технологической операции.

### **14.7. Литература по теме**

14.1. Ушаков Н.Н. Технология производства ЭВМ: Учеб. для вузов. - М.: Высш. шк., 1991. - 416 с.

### **14.8. Вопросы для самопроверки**

- 1. Что такое технологичность?*
- 2. Дайте определение производственному и технологическому процессам. На какие составляющие разделяется операция?*
- 3. Назовите отличительные признаки типов производства.*
- 4. Какие задачи решает ТПП?*
- 5. Назовите виды технологической документации.*

## **ЛЕКЦИЯ 15. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА РЭС**

*Введение: Основные понятия и определения.*

*Виды ТП в производстве РЭС: Заготовительные цеха. Холодная штамповка. Литейные цеха. Механическая обработка со снятием стружки. Очистка деталей и узлов. Гальванические цеха. Производство печатных плат. Лакокрасочные покрытия. Сборочные цеха. Выпуск ИС частного применения.*

*Организация ТП сборки и монтажа: Понятие сборки и монтажа. Стационарная и подвижная сборка. Концентрация операций. Дифференцированная сборка. Основные принципы ТП сборки и монтажа: параллельность, прямоточность, непрерывность, пропорциональность, ритмичность.*

*Проектирование ТП сборки и монтажа: Исходные данные. Основные этапы процесса проектирования. Маршрут сборки. Веерная сборка и сборка с базовой деталью. Границы дифференциации. Оптимизация ТП.*

### **15.1. Введение**

**В** соответствии с ГОСТ 14.301-83 средства технологического оснащения включают: технологическое оборудование (в том числе контрольное и испытательное); технологическую оснастку (в том числе инструменты и средства контроля); средства механизации и автоматизации производственных процессов.

*Технологическое оборудование* - это орудия производства, в которых для выполнения определенной части ТП размещаются материалы (заготовки), средства воздействия на них и при необходимости источники энергии.

*Технологическая оснастка* - это орудия производства, добавляемые к технологическому оборудованию для выполнения определенной части ТП.

*Средства механизации* - это орудия производства, в которых ручной труд частично или полностью заменен машинным с сохранением участия человека в управлении машинами.

*Средства автоматизации* - это орудия производства, в которых функции управления переданы машинам и приборам.

### **15.2. Виды ТП в производстве РЭС**

Состав технологического оборудования и применяемой технологической оснастки целесообразно рассмотреть исходя из профиля цехов производства РЭС.

*Заготовительные цеха* оснащены оборудованием для получения заготовок из стандартных профилей и листов (заготовки для механических цехов, заготовки печатных плат, заготовки для сборки каркасов блоков, рам, стоек и др.). Резку листовых и роспуск рулонов металлических и неметаллических материалов производят в основном гильотинными и роликовыми ножницами. Неметаллические материалы толщиной свыше 2. 5 мм режут на специальных станках дисковыми пилами, фрезами, а также абразивными и алмазными отрезными кругами.

*Холодная штамповка* является одним из основных методов получения деталей в производстве РЭС. Примерно 50...70 % деталей несущих конструкций и элементов крепления получают с помощью данной операции, хотя общая трудоемкость штампованных деталей, несмотря на их высокий удельный вес в структуре конструкции, составляет всего 8..10 %. Это объясняется достаточно высокой механизацией и автоматизацией данного производства. Чаще всего штамповочные цехи оснащены эксцентриковыми и кривошипными прессами простого и двойного действия, которые относятся к категории универсального оборудования. В производстве РЭС широкое применение получил метод поэлементной штамповки, который заключается в последовательной обработке простейших элементов деталей (участков наружного контура, внутренних отверстий, пазов и т.д.) на сменных штампах координатно-револьверных прессов, универсально-сборочных штампах. В последние годы в холодно-штамповочное производство успешно внедряют промышленные роботы. Они позволяют механизировать вспомогательные операции (подачу полос, лент и

штучных заготовок, съем и учет деталей и др.) по обслуживанию прессов, превратить универсальные прессы в комплексно-автоматизированные агрегаты.

*Литейный цех*, *цех изготовления деталей из пластмасс* имеют высокопроизводительные машины для литья и прессования, прессы-автоматы. Это оборудование позволяет получать заготовки с минимальными припусками на механическую обработку.

Удельный вес *механической обработки деталей* снятием стружки в производстве РЭС все еще велик (36...37 % от общей трудоемкости). С переходом на изготовление аппаратуры новых поколений изменяется качественное содержание механической обработки, она становится более прецизионной. Механические цехи оснащены преимущественно токарными станками и автоматами, универсальными фрезерными и сверлильными станками и др. Механизация и автоматизация в механических цехах развивается по следующим направлениям:

- максимальное использование токарных автоматов, холодновысадочных автоматов и токарно-револьверных станков, доведение их применения до 50 % от общей трудоемкости механической обработки цеха;
- внедрение станков с программным управлением и ЧПУ и создание на их базе автоматизированных систем управления технологическим процессом с использованием промышленных роботов для механизации вспомогательных операций;

- оснащение универсальных станков механизмами, работающими в качестве зажимных быстродействующих устройств, автоматических загрузочных, контрольно-измерительных и прочих устройств;
- организация для определенных групп деталей небольших поточных линий (микротококов) с замкнутым циклом обработки;
- механизация операций вспомогательного производства: транспортировки деталей, уборки стружки, складирования и выдачи полуфабрикатов, инструмента, технической документации, диспетчерского контроля за работой оборудования.

Очень важными для производства РЭС являются вопросы *очистки деталей*. Так, например, после механической обработки на поверхности деталей остаются загрязнения, без удаления которых невозможно выполнять такие технологические операции, как нанесение токопроводящих и защитных покрытий. Качество очистки деталей обеспечивает получение заданных параметров функциональных узлов. Еще более сложными являются вопросы промывки собранных узлов и блоков, удаления остатков паяльных флюсов и других загрязнений, влияющих на надежность аппаратуры. Совершенствование технологии очистки поверхности деталей и промывки узлов идет в последние годы по пути замены взрывоопасных, легковоспламеняющихся и токсичных органических растворителей водными растворами синтетических моющих препаратов и щелочных обезжиривающих растворов, а снижение трудоемкости очистных операций достигается за счет применения конвейерных, карусельных моечных машин, ультразвуковых ванн, центрифуг, установок с механизмами вибрационного качания и др.

*Гальванические цеха* в зависимости от экономически целесообразного уровня механизации оснащаются такими видами оборудования, как автоматы (автоматические линии), обеспечивающие без участия человека передачу деталей с одной позиции на другую и выдержку их в ваннах с соответствии с заданной программой обработки или автоматизированными системами управления технологическим процессом гальванопокрытий.

*Цехи по производству печатных плат* оснащены универсальным оборудованием, разработанным специально для выпуска такого вида продукции. Это механизированные и автоматизированные линии химической, электрохимической обработки, установки для нанесения фоторезистов и сеткографии, станки с ЧПУ для механической обработки, автоматизированные стенды контроля плат. Оборудование с ЧПУ применяют для изготовления фотошаблонов и трафаретов, сверления монтажных отверстий и фрезерования ПП.

В цехах лакокрасочных покрытий высокий уровень механизации достигается путем организации технологических поточных линий. При внедрении поточно-механизированных линий в окрасочных цехах тупиковые окрасочные и сушильные камеры заменяют проходными камерами, а в качестве транспортирующих устройств используют грузонесущие и толкающие конвейеры. В настоящее время окраска является одним из немногих видов обработки, где роботы нашли применение как автономные агрегаты (роботы-маляры) самостоятельно владеющие рабочим инструментом-распылителем.

*Сборочные цеха* оснащены как универсальным, так и специальным оборудованием и оснасткой (переналаживаемые конвейерные линии и универсальные рабочие места электромонтажников, специализированное оборудование по подготовке, установке и пайке электрорадиоэлементов на печатные платы, стенды для контроля и регулировки функциональных параметров сборочных единиц, блоков, панелей и стоек РЭС). Так, при сборке ячеек с элементами, имеющими осевые выводы (например, резисторы МЛТ), их клеивают по специальной программе в ленту, которая затем поступает в автомат для установки их на плату. На оборудовании с ЧПУ проводят установку и пайку ИС с планарными выводами, а также осуществляют контроль электрических цепей ячеек. Программное управление обеспечивает автоматизацию проводного монтажа (трассировку проводов на платах; укладку проводов в электрических жгутах, монтаж соединений накруткой, контроль электрических цепей в модулях всех уровней).

Предприятия, выпускающие РЭС на *ИС частного применения*, оснащены оборудованием, используемым в электронной промышленности: установки для диффузии, ионного легирования, эпитаксии и термического окисления, оборудование для термического испарения материалов в вакууме, а также сборки и герметизации ИС, причем участки изготовления фотошаблонов обслуживают как цехи ИС, так и цехи печатных плат.

### 15.3. Организация ТП сборки и монтажа

*Сборка* представляет собой совокупность технологических операций механического соединения деталей и ЭРЭ в изделии или его части, выполняемых в определенной последовательности для обеспечения заданного их расположения и взаимодействия. Выбор последовательности операций сборочного процесса зависит от конструкции изделия и организации процесса сборки. Сборочные соединения бывают подвижными, если сопряженные детали могут перемещаться в определенных направлениях относительно друг друга, или неподвижными, если их взаимное расположение сохраняется неизменным. В свою очередь они разделяются на разъемные и неразъемные.

*Монтажом* называется ТП электрического соединения ЭРЭ изделия в соответствии с принципиальной или электромонтажной схемой. Монтаж проводится с помощью печатных, проводных или тканых плат, одиночных проводников, жгутов и кабелей. Основу монтажно-сборочных работ составляют процессы формирования электрических и механических соединений.

В соответствии с последовательностью технологических операций процесс сборки или монтажа делится на сборку (монтаж) отдельных сборочных единиц (плат, блоков, панелей, рам, стоек) и общую сборку (монтаж) изделия. Организационно он может быть стационарным или подвижным с концентрацией или дифференциацией операций.

*Стационарной* называется сборка, при которой собираемый объект неподвижен, а к нему в определенные промежутки времени подаются необходимые сборочные элементы. Подвижная сборка характеризуется тем, что сборочная единица перемещается по конвейеру вдоль рабочих мест, за каждым из которых закреплена определенная часть работы. Перемещение объекта сборки может быть свободным по мере выполнения закрепленной операции или принудительным в соответствии с ритмом процесса.

*Сборка по принципу концентрации операций* заключается в том, что на одном рабочем месте производится весь комплекс работ по изготовлению изделия или его части. При этом повышается точность сборки, упрощается процесс нормирования. Однако большая длительность цикла сборки, трудоемкость механизации сложных сборочно-монтажных операций определяют применение такой формы в условиях единичного и мелкосерийного производства.

*Дифференцированная сборка* предполагает расчленение сборочно-монтажных работ на ряд последовательных простых операций. Это позволяет легче механизировать и автоматизировать работы, использовать рабочих низкой квалификации. Сборка по принципу дифференциации операций эффективна в условиях серийного и массового производства. Однако чрезмерное дробление операций приводит к возрастанию потерь вспомогательного времени на транспортировку, увеличению производственных площадей, повышению утомляемости рабочих при выполнении несложных однообразных действий. Поэтому в каждом конкретном случае должна быть определена технико-экономическая целесообразность степени дифференциации сборочных и монтажных работ.

К монтажно-сборочным процессам предъявляются требования высокой производительности, точности и надежности. На повышение производительности труда существенное влияние оказывают не только степень детализации процесса и специализации рабочих мест, но и такие организационные принципы, как параллельность, прямоточность, непрерывность, пропорциональность и ритмичность.

*Параллельность сборки* - это одновременное выполнение частей или всего технологического процесса, что приводит к сокращению производственного цикла. Использование этого принципа обусловлено конструкцией РЭС, степенью ее расчленения на сборочные единицы. Наибольшими возможностями с технологической точки зрения обладают два вида обеспечения параллельности процессов:

- изготовление и сборка на многопредметных поточных линиях одновременно нескольких изделий; - совмещение на автоматизированных поточных линиях изготовления деталей с их сборкой.

При организации производственного процесса стремятся обеспечить кратчайший путь прохождения изделия по всем фазам и операциям от запуска исходных материалов и ЭРЭ до выхода готового изделия. Любые отклонения от прямоточности усложняют процесс сборки, удлиняют цикл изготовления радиоаппаратуры. Принцип прямоточности должен соблюдаться во всех подразделениях предприятия и сочетаться с принципом непрерывности.

*Непрерывность ТП сборки* предусматривает сокращение или полное устранение меж- и внутриоперационных перерывов. Достигается непрерывность рациональным выбором техпроцессов, соединением операций изготовления деталей с их сборкой, включением в поток операций влагозащиты, контроля и регулировки.

*Под принципом пропорциональности* в организации производственного процесса понимается пропорциональная производительность в единицу времени на каждом рабочем месте, линии, участке, цехе. Это приводит к полному использованию имеющегося оборудования, производственных площадей и равномерному выпуску изделий. Улучшает пропорциональность рациональное деление конструкции на сборочные единицы и унифицированность ее элементов.

*Принцип ритмичности* предполагает выпуск в равные промежутки времени одинаковых или возрастающих количеств продукции. Ритмичность при сборке повышается за счет использования типовых и групповых процессов, их унификации и предварительной синхронизации операций.

## **15.4. Проектирование ТП сборки и монтажа**

Проектирование ТП сборки и монтажа РЭС начинается с тщательного изучения на всех производственных уровнях исходных данных, к которым относятся:

- краткое описание функционального назначения изделия;
- технические условия и требования;
- комплект конструкторской документации;
- программа и плановые сроки выпуска;
- руководящий технический, нормативный и справочный материал.

К этим данным добавляются условия, в которых предполагается изготавливать изделия: новое или действующее предприятие, его местонахождение, имеющееся на нем оборудование и возможности приобретения нового, кооперирование с другими предприятиями, обеспечение материалами и комплектующими изделиями. В результате проведенного анализа разрабатывается план технологической подготовки и запуска изделия.

В разработку ТП сборки и монтажа входит следующий комплекс взаимосвязанных работ:

- выбор возможного типового или группового ТП и его доработка в соответствии с ТЗ;
- составление маршрута единичного ТП общей сборки и установление технологических требований к конструкциям входящих в нее блоков и сборочных единиц;
- составление маршрутов единичных ТП сборки блоков (сборочных единиц) и установление технологических требований к входящим в них сборочным единицам и деталям;
- определение необходимого технологического оборудования, оснастки, средств механизации и автоматизации;
- моделирование и оптимизация техпроцесса по производительности;
- разбивка ТП на элементы;
- расчет и назначение технологических режимов, техническое нормирование работ и определение квалификации рабочих; разработка ТП и выбор средств контроля, настройки и регулировки;
- выдача технического задания на проектирование и изготовление специальной технологической оснастки;
- расчет и проектирование поточной линии, участка серийной сборки или гибкой производственной системы, составление планировок и разработка операций перемещения изделий и отходов производства;
- выбор и назначение внутрицеховых подъемно-транспортных средств, организация комплектовочной площадки;
- оформление технологической документации на процесс в соответствии с ЕСТД и ее утверждение;
- выпуск опытной партии;
- корректировка документации по результатам испытания опытной партии.

Разработка технологического маршрута сборки и монтажа РЭС начинается с расчленения изделия или его части на сборочные элементы путем построения схем сборочного состава и технологических схем сборки. Элементами сборочно-монтажного производства являются детали и сборочные единицы различной степени сложности. Построение таких схем позволяет установить последовательность сборки, взаимную связь между элементами и наглядно представить проект ТП. Сначала в компактном виде составляется схема сборочного состава всего изделия, а затем ее дополняют развернутыми схемами отдельных сборочных единиц. Расчленение изделия на элементы проводится независимо от программы выпуска и характера ТП сборки. Схема сборочного состава служит основой для разработки технологической схемы сборки, в которой формируется структура операций сборки, устанавливается их оптимальная последовательность, вносятся указания по особенностям выполнения операций.

На практике широко применяются два типа схем сборки: "верный" и с базовой деталью. Сборочные элементы на схемах сборки представляют прямоугольниками, в

которых указывают их название, номер по классификатору ЕСКД, позиционное обозначение и количество. Более трудоемкой, но наглядной и отражающей временную последовательность процесса сборки является схема сборки с базовой деталью. За базовую принимается шасси, панель, плата или другая деталь, с которой начинается сборка.

Состав операций сборки определяют исходя из оптимальной дифференциации монтажно-сборочного производства. Требования точности, предъявляемые к сборке РЭС, в большинстве своем ведут к необходимости концентрации процесса на основе программируемого механизированного и автоматизированного оборудования.

При непоточном производстве целесообразными технологическими границами дифференциации являются:

- однородность выполняемых работ;
- получение в результате выполнения операции законченной системы поверхностей деталей или законченного сборочного элемента;
- независимость сборки, хранения и транспортирования от других сборочных единиц;
- возможность использования простого (универсального) или переналаживаемого технологического оснащения;
- удобство планировки рабочих мест и участков;
- обеспечение минимального удельного веса вспомогательного времени в операции;
- установившиеся на данном производстве типовые и групповые операции.

В поточном производстве необходимый уровень дифференциации определяется в основном ритмом сборки.

Оптимальная последовательность технологических операций зависит от их содержания, используемого оборудования и экономической эффективности. В первую очередь выполняются неподвижные соединения, требующие значительных механических усилий. Каждая предыдущая операция не должна препятствовать выполнению последующих. На заключительных этапах собираются подвижные части изделий, разъемные соединения, устанавливаются детали, заменяемые в процессе настройки.

Разработанная схема сборки позволяет проанализировать ТП с учетом технико-экономических показателей и выбрать оптимальный технологический процесс как с технической, так и с организационной точек зрения.

### **15.5. Литература по теме**

1. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов/ Под ред. А.П. Достанко, Ш.М. Чабдарова. - М.: Радио и связь, 1989. - 24 с.

### **15.6. Вопросы для самопроверки**

1. *Что понимается под средствами технологического оснащения?*
2. *Назовите и охарактеризуйте основные виды ТП в производстве РЭС.*
3. *Как организуется сборка и монтаж РЭС?*
4. *Какова последовательность проектирования технологических процессов в производстве РЭС?*

**ЛЕКЦИЯ 16. ОРГАНИЗАЦИЯ СБОРКИ И МОНТАЖА РЭС**

**Введение:** Состав ТП сборки и монтажа ПП.

**Входной контроль комплектующих элементов:** Необходимость контроля. Последовательность контроля. Виды и объем контроля. Выбор вида контроля.

**Подготовка элементов к монтажу на ПП:** Распаковка, формовка выводов, размещение в технологической таре.

**Сборка компонентов на печатных платах:** Ручная сборка. Механизированная установка с пантографами. Автоматизированная установка.

**Монтаж элементов:** Нанесение и сушка флюса. Пайка. Очистка.

**Общая сборка и монтаж РЭС:** Сборка несущего основания. Межблочный монтаж.

**Технический контроль РЭС:** Состав контроля. Виды контроля. Контроль креплений и соединений. Функциональный и системный контроль.

**Технологическая тренировка:** Необходимость тренировки. Параметры тренировки.

**16.1. Введение**

Технологический процесс сборки и монтажа элементов на печатных платах можно разделить на несколько составных частей. Сюда относятся:

- входной контроль комплектующих элементов;
- подготовка элементов к монтажу;
- сборка компонентов на печатных платах;
- пайка элементов.

**16.2. Входной контроль комплектующих элементов**

Необходимость входного контроля вызвана ненадежностью выходного контроля на заводе-изготовителе, а также воздействием различных факторов при транспортировании и хранении. Технологический маршрут испытаний составляется на основании следующих видов испытаний:

- проверка внешнего вида;
- выборочный контроль габаритных, установочных и присоединительных размеров;
- проверка технологических свойств (паяемости, свариваемости);
- проведение электротермотренировки в течение 168 часов при повышенной температуре среды;
- проверка статических электрических параметров при нормальных климатических условиях, пониженной и повышенной температуре среды;
- проверка динамических параметров при нормальных климатических условиях;
- функциональный контроль при нормальных климатических условиях и повышенной рабочей температуре среды.

Объем и условия проведения испытаний устанавливаются для каждого вида изделия. Входной контроль может быть как 100%-ным, так и выборочным. Объем выборки определяется по уравнению

$$n = t_p \sigma^2 / \alpha,$$

в зависимости от принятого уровня вероятности  $t_p$ , закона распределения погрешностей  $\sigma$  и заданной точности расчетов  $\alpha$ . Обычно устанавливается следующее правило: если при выборочном контроле число бракованных элементов превысит приемочное, то проверяется удвоенное число изделий. Если при дополнительной проверке будет обнаружен хотя бы один бракованный элемент, проверяется вся партия.

Сравнительный анализ стоимости контрольных операций и затрат на замену бракованных элементов в готовых изделиях позволяет оценить целесообразность и выбрать вид входного контроля. Полная стоимость работ по обеспечению качества готовых изделий определяется уравнениями:

- при отсутствии входного контроля

$$C_0 = PNC_R;$$

- при 100%-ном контроле

$$C_c = NC_K + K_1 PNC_R;$$

- при выборочном контроле

$$C_6 = P_A [nC_K + (N-n)PC_R + nK_2PC_R] + nC_K(1-P_A)/P_A,$$

где  $P$  - гарантированная изготовителем вероятность брака среди поступающих элементов;  $N$  - общее число установленных элементов;  $C_R$  - затраты на поиск и ремонт неисправного элемента;  $C_K$  - стоимость контроля одного элемента;  $K_1$  - доля брака, пропущенного при 100%-ном контроле;  $P_A$  - вероятность приемки партии;  $K_2$  - доля брака, пропущенного при выборочном контроле. Анализ этих соотношений показывает, что при высоком гарантированном качестве элементов входной контроль не нужен, а при низком необходим - 100%-ный контроль.

### 16. 3. Подготовка элементов к монтажу

Подготовка ЭРЭ и ИС включает распаковку компонентов, рихтовку, зачистку, формовку, обрезку и лужение выводов, размещение элементов в технологической таре. На печатных платах оплачивается монтажное покрытие в нагретом теплоносителе (глицерин) или ИК-излучением, методом сеткографии наносятся маркировочные знаки. В мелкосерийном производстве подготовка осуществляется с ручной подачей компонентов, при массовом производстве - на установках комплексной подготовки, объединяющих две и более операций с автоматической подачей компонентов в зону обработки.

*Рихтовка (выпрямление), формовка и обрезка аксиальных и радиальных выводов, выводов транзисторов* проводится на групповой технологической оснастке, представляющей собой штамп (формующий, отрезной) с пневматическим приводом и набором сменных элементов. Производительность такого оборудования меняется от 1500 эл./час при ручной подаче до 20 тыс. эл./час при подаче с ленты.

*Подготовка к монтажу ИС с планарными выводами* в условиях массового производства проводится на модульной автоматической линии, включающей унифицированные модули распаковки ИС из тары-спутника, формовки и обрезки выводов, флюсования и лужения выводов холодной напрессовкой припоя ПОС-61 и укладки ИС в технологические кассеты. Производительность линии до 900 эл./час.

Для повышения производительности сборочных автоматов элементы упаковывают в технологические кассеты (для ИС) или липкую ленту. Элементы могут клеиваться в ленту одного номинала (для автоматизированных линий) или разных номиналов и типоразмеров по программе (для отдельных автоматов).

### 16. 4. Сборка компонентов на печатных платах

Сборка компонентов на ПП состоит из подачи их к месту установки, ориентации выводов относительно монтажных отверстий или контактных площадок, сопряжение со сборочными элементами и фиксации в требуемом положении. Она в зависимости от характера производства может выполняться вручную, механизированным или автоматизированным способами. Применение ручной сборки экономически выгодно при установке порядка 1,5 млн. компонентов в год. Ее существенным достоинством является возможность постоянного визуального контроля, что позволяет использовать относительно большие допуски на размеры выводов, контактных площадок и монтажных отверстий, делает возможным обнаружение дефектов ПП и компонентов. При установке от 0,5 до 5 млн. компонентов в год, применяют оборудование с пантографами, оснащенное механизированными укладочными головками.

Если число устанавливаемых компонентов составляет от 5 до 50 млн. шт., целесообразно устанавливать автоматизированное оборудование с управлением от ЭВМ. В условиях массового выпуска однотипных ПП (0,5...1 млн. шт. в год) применяются многостаночные линии, в которые входит до 50 единиц автоматического оборудования.

Основная задача сборщика при ручной сборке состоит в оперативной и правильной установке требуемого элемента на соответствующее место на ПП. Для уменьшения количества ошибок на печатную плату со стороны установки элементов методом сеткографии наносятся позиционные обозначения элементов и направление их установки или используется эталонная собранная плата. Такие же обозначения имеют кассеты и магазины с элементами. Печатные платы устанавливаются в держателе при помощи быстрозажимных фиксаторов. Повышение производительности достигается применением многопозиционного держателя, в котором параллельно друг другу располагается несколько печатных плат. Рабочий за один прием устанавливает необходимое число одинаковых элементов во все платы.

При ручной сборке ИС используют специальные механические держатели, обеспечивающие заданное положение всех выводов или вакуумные захваты. После сопряжения компонентов с поверхностью ПП их положение может фиксироваться: подгибкой выводов у пассивных элементов, двумя диагонально расположенными выводами и ИС со штыревыми выводами, приклеивание к плате флюсом, клеем, липкой лентой или путем установки в специальные держатели, расположенные на плате.

Производительность и качество ручной сборки повышаются при использовании сборочных столов с индексацией адреса установки компонентов. Каждое рабочее место комплектуется кассетницей элеваторного или тарельчатого типа, связанной с устройством индексации. При работе по жесткой программе предварительно создается сборочная матрица, в которой в соответствии с чертежом ПП располагаются светодиоды в местах установки элементов. При подключении сборочного стола к сети загорается первая пара светодиодов в матрице, которые определяют положение элемента на плате. Одновременно загорается лампочка на кассете, из которой нужно взять элемент (или кассетница поворачивается нужной позицией к окошку). После установки элемента загорается следующая пара светодиодов и т.д.. Направление установки полярных или многопозиционных элементов отмечается с помощью мигающего светодиода.

Технологические возможности расширяются с применением сборочных столов с гибкой индексацией адреса. В этом случае программа установки записывается на магнитный диск и переход на новую плату не вызывает затруднений. Индикация места установки в этом случае может производиться сфокусированным лучом света (лазерная "указка"). За смену с помощью такого стола можно установить до 6000 компонентов.

*Механизированная установка с пантографом* состоит из монтажного стола с двухкоординатным перемещением, на котором укрепляется держатель одной или нескольких плат, магазина компонентов, установочной головки, механизма фиксации компонентов и устройства позиционирования стола. Компоненты с аксиальными и радиальными выводами поступают на сборку вклеенными в ленту в заданной последовательности, а призматические компоненты подаются в зону установки из вертикально расположенных магазинов.

Печатная плата по базовым штифтам устанавливается на держатель и закрепляется зажимным элементом. Ее позиционирование производится вручную при помощи пантографа, состоящего из копирного щупа и системы рычагов, передающих движение от щупа к присоединенному монтажному столу. Копирный щуп пантографа вводится в соответствующее отверстие шаблона, определяя положение монтажного стола относительно установочной головки. Так как пантограф работает в масштабе 1:1, то в качестве шаблона используется ПП с рассверленными отверстиями. Производительность сборочных установок с пантографами достигает 2...2,5 тыс. компонентов в час.

В автоматических станках позиционирование сборочного стола осуществляется с высокой скоростью и точностью. Одновременно автоматизируется весь комплекс работ по

установке и фиксации элементов на плате, включая контроль. Возможность гибкого управления сборочным оборудованием и высокая производительность (18...24 тыс. эл./час) позволяют использовать их как в условиях серийного, так и крупносерийного производства. Однако стоимость такого оборудования в 5...7 раз выше стоимости станков с пантографами, повышаются требования к жесткости конструкции станка и точности выполнения рисунка ПП.

Сборочные машины для компонентов с планарными выводами снабжаются контактирующими устройствами, которые выполняют монтажные операции сразу после сопряжения элементов. Наибольшее распространение для этих целей получил способ пайки оплавлением *U*-образным электродом. В качестве материала электрода используется вольфрам или молибден, не смачиваемые припоем. Совершенствование автоматического оборудования идет по пути повышения универсальности и расширения технических возможностей. Автоматы снабжаются системами оперативного контроля ИС и диагностики собранных изделий, модулями загрузки и выгрузки на основе программируемых роботов, модулями сборки нестандартных элементов (теплоотводов, потенциометров, переключателей) и др.

### 16.5. Монтаж элементов

Технологический процесс монтажа состоит из следующих операций: нанесение и сушка флюса, предварительный нагрев платы и компонентов, пайка, обрезка выводов, очистка.

*Нанесение флюса* на соединяемые поверхности осуществляется различными способами, выбор которых определяется составом флюса, технологической схемой пайки, способом закрепления выводов в отверстиях, степенью автоматизации и экономичностью. Наибольшее распространение получили следующие способы: кистью, погружением, протягиванием, накатыванием, распылением, вращающимися щетками, которые применяются в единичном и серийном производстве. При массовом производстве используют пенное или волновое флюсование.

*Способ вспенивания* широко применяется в автоматизированных поточных линиях вследствие своей простоты и экономичности. Нанесенный тонкий слой при последующей пайке может быть полностью удален расплавленным припоем. Однако такое нанесение не гарантирует полное смачивание флюсом всех металлизированных отверстий, заполненных выводами компонентов. Кроме того большая поверхность и хорошие условия для испарения в процессе работы изменяют процентный состав раствора и ухудшают качество пайки.

Более полное и надежное нанесение флюса на поверхность ПП при уплотненном монтаже достигается использованием *волнового флюсования*. При этом флюс не только равномерно покрывает нижнюю поверхность платы, но и проникает в металлизированные монтажные отверстия. К недостаткам способа относятся увеличенный расход материалов, усложнение технологического оборудования, повышенные требования к коррозионной стойкости деталей, находящихся во флюсе, и точности поддержания высоты волны.

Предварительная *тепловая обработка* смонтированных блоков обычно проводится в два этапа: сначала при температуре кипения постепенно удаляется растворитель флюса, а затем плату интенсивно нагревают до температуры 120...150°C. Для этого используют радиационные нагревательные плиты или трубчатые инфракрасные излучатели, которые располагаются под движущимися платами.

*Групповая пайка компонентов* со штыревыми выводами проводится волной припоя на автоматизированных установках модульного типа, которые оснащаются конвейерами с постоянным или регулируемым углом наклона относительно зеркала припоя.

После пайки на поверхности плат остается некоторое количество флюса и продуктов ее разложения, которые способны вызвать коррозию контактных соединений и ухудшить диэлектрические характеристики используемых материалов. Поэтому предусматривается

*очистка смонтированных ПП*, способ проведения которой определяется степенью и характером загрязнений. Обычно применяют отмывку в различных моющих средах. Технологически просто происходит удаление остатков водорастворимых флюсов путем промывки плат в проточной горячей воде с использованием мягких щеток или кистей. Следы канифольных флюсов удаляются промывкой в течение 0,5...1 мин в таких растворителях, как спирт, смесь бензина и спирта (1:1) или фенола и ацетона (7:1), трихлорэтилен, четыреххлористый углерод и др. Отмывка производится в специальных вибрационных установках, колеблющихся с частотой 50 Гц и амплитудой 1...2 мм, на волне моющего раствора со щетками или струйным методом. Если печатный монтаж способен выдержать температуру паровой обработки, то рекомендуются эффективные установки, в которых очистная жидкость, конденсируясь на поверхности холодного изделия, растворяет остатки флюса. Перспективной является очистка плат с применением УЗ-колебаний частотой 20...22 кГц и амплитудой 0,5...1 мм в спирто-бензиновой или спирто-фенольной смеси. Одной промывкой не удастся удалить все загрязнения с поверхности ПП, поэтому применяют многократную обработку с изменением способа и реагента.

### **16.6. Общая сборка и монтаж РЭС**

Отдельные детали, сборочные единицы и блоки, прошедшие операции контроля, поступают на общую сборку и монтаж. Схема типового процесса сборки включает сборку несущего основания (панели, рамы, стойки) и монтаж при помощи жгутов и кабелей. Несущее основание собирают с применением разъемных и неразъемных соединений. На его плоскостях согласно монтажной схеме укладывают жгуты, устанавливают соединители, контактные колодки. Жгут на каркасе крепится металлическими скобами с установкой под ними изоляционных трубок или прокладок из лакоткани. Расстояние между скобами (20...50 см) зависит от диаметра жгута. При размещении жгута учитывают требования ремонтпригодности. Одновременно с укладкой жгута разводят концы одиночных проводов и кабелей к соответствующим контактам с последующей пайкой или накруткой. Допускается наложение жгутов или их участков друг на друга. Для предохранения жгутов из неэкранированных проводов от механических повреждений в местах их прокладки через отверстия в стенках металлических шасси или экранов предусматривают изоляционные трубки.

В смонтированный каркас вставляются отдельные блоки и соединяются с остальными частями схемы. После выполнения монтажных работ блок укрепляется на каркасе при помощи винтовых соединений. Заканчивается общая сборка закреплением регулировочных элементов, установкой кожухов и соединителей питания.

### **16.7. Технический контроль РЭС**

Изготовленные блоки и собранные изделия подвергаются техническому контролю. Контрольные операции включают визуальный контроль монтажа, автоматический контроль правильности монтажных соединений, функциональный контроль блоков и системный контроль всего прибора. Контроль крепления деталей, сборочных единиц и прочности паек производится внешним осмотром. Дефектом пайки часто является так называемая фальшивая пайка, когда соединяемые поверхности плохо залужены и припой не заполняет пространства между деталями и проводниками. Такое соединение обладает большим электрическим сопротивлением, вызывает появление шумов и тем самым нарушает нормальную работу схемы. Качественная пайка должна быть "скелетной", т.е. под припоем должен быть виден контур подсоединенного вывода, а место спая - без пор, трещин, вздутий, наплывов и остатков флюса, с блестящей поверхностью. При осмотре паек следят, чтобы изоляция провода вплотную подходила к контакту и не имела ожогов. Механическую прочность крепления деталей, сборочных единиц и монтажа проверяют на специальных

вибростендах. Контроль правильности электрических соединений в единичном и мелкосерийном производстве проверяют вручную при помощи универсальной измерительной аппаратуры по картам сопротивлений и монтажной схеме. В массовом производстве для этих целей широко применяют автоматические тестеры, работающие по принципу неуравновешенного моста.

Функциональный контроль блоков подразумевает проверку логических связей при помощи специальных диагностических тестов. Заключительным этапом контроля является системный в приборе. Для этих целей используется универсальная контрольно-измерительная аппаратура. В условиях массового производства применяют специальные технологические стенды контроля.

### **16.8. Технологическая тренировка РЭС**

Технологическая тренировка представляет собой испытания аппаратуры, при которых она работает в определенных условиях, с целью выявления и устранения приработочных отказов.

*Период приработки* - это начальный период работы аппаратуры, характеризующийся повышенным значением частоты отказов, на протяжении которого происходит выявление неизбежных производственных дефектов сборки и монтажа РЭС, а также дефектов комплектующих.

Продолжительность периода приработки обычно лежит в пределах 10...200 ч работы в зависимости от надежности, количества и типов ЭРЭ, а также технологии и культуры производства. Определяют период приработки расчетным или графическим методом. Расчетный метод предполагает использование предварительно накопленной информации об отказах на этапе производства и эксплуатации РЭС. Графический метод состоит в построении экспериментальным путем зависимости изменения потока отказов от времени работы аппаратуры.

При проектировании технологической тренировки определяются:

- время проведения тренировки;
- последовательность технологических испытаний;
- жесткость испытаний;
- периодичность проверки параметров изделий;
- объем контролируемых параметров.

Время технологической тренировки аппаратуры уменьшают, если в приемосдаточных испытаниях аппаратуры предусмотрены испытания на воздействие климатических и механических факторов с определенным временем наработки.

Последовательность технологических испытаний должна быть такой, при которой постепенно уменьшается жесткость режима. Это дает возможность выявить "приобретенные" дефекты на следующих видах испытаний, менее разрушительных. Кроме того, такая последовательность позволяет точнее определить момент окончания периода приработки и тем самым избежать необоснованно вводимых технологических прогонов.

После окончания жестких технологических испытаний аппаратура должна проработать в нормальных условиях время, превышающее время испытаний.

При проведении технологической тренировки осуществляется контроль только основных параметров. Рекомендуется проводить контроль до и после проведения испытаний.

### **16.9. Литература по теме**

1. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов/ Под ред. А.П. Достанко, Ш.М. Чабдарова.- М.: Радио и связь, 1989. - 624 с.

### **16.10. Вопросы для самопроверки**

- 1. С какой целью проводится входной контроль компонентов?*
- 2. Как готовятся компоненты к монтажу на ПП?*
- 3. Как устанавливаются и запаиваются элементы на ПП?*
- 4. Как проводится общая сборка, контроль и тренировка РЭС?*

## **ЛЕКЦИЯ 17. ТЕХНОЛОГИЯ МОНТАЖА НА ПОВЕРХНОСТЬ**

*Введение: Перспективность ТПМ. Лидерство США и Японии.*

*Ключевые вопросы ТПМ: Новые возможности - новые устройства. Корпуса. Технологичность. Теплоотвод. Компоненты и корпуса ТПМ. Пассивные компоненты. Активные компоненты и ИС. Коммутационные платы. Особенности процессов в ТПМ: Отличия от традиционной технологии варианта компоновки. 3 варианта компоновки.*

### **17.1. Введение**

Развитием монтажно-сборочных работ на ПП является переход от монтажа компонентов с выводами в отверстия к поверхностному монтажу безвыводных компонентов в микрокорпусах или компонентов с планарными выводами. Через 30 лет после своего появления техника поверхностного монтажа компонентов (ТПМ) вышла на мировую арену как наиболее перспективное средство повышения производительности труда при изготовлении схемных плат и улучшения их функциональных характеристик. Если в 1983 г. в США доля общих поставок компонентов для ТПМ составляла менее 1%, то в 1986 г. на долю поверхностного монтажа пришлось уже 12%, а в 1992 г. - 35% (в Японии - 60%) всего объема сборки электронных устройств.

Промышленно развитые страны, прежде всего США и Япония, благодаря координированным усилиям ученых, предпринимателей и правительственных органов лидируют в освоении техники поверхностного монтажа при массовом выпуске радиоэлектронной аппаратуры. Стремительное развитие техники поверхностного монтажа объясняется прежде всего экономическими соображениями, так как позволяет в процессе конструирования радиоэлектронной аппаратуры уменьшить габариты, снизить расход материалов и энергии, объем и массу корпусов и стоек, в которых должны размещаться электронные системы и, следовательно, уменьшить площадь сооружений. Используя технику поверхностного монтажа, можно создавать более быстродействующие, помехоустойчивые и надежные радиоэлектронные и вычислительные средства.

К сожалению, в России на сегодняшний день нет не только широкомасштабного производства аппаратуры с использованием ТПМ, но даже прекратилась пропаганда и изучение опыта в этой области, начатые в период существования СССР. Однако внедрять ТПМ несомненно предстоит, поскольку это объективный процесс, магистральный путь развития технологии производства в эпоху микроэлектроники /1/.

### **17.2. Ключевые вопросы ТПМ**

Техника поверхностного монтажа способствовала появлению множества новых портативных потребительских изделий: видеокамеры высокого разрешения, переносные телефоны, калькуляторы, малогабаритные компьютеры и т.д.

В 80-х годах появились БИС в новых корпусах SOIC (Small Outline Integrated Circuit) и в пластмассовых кристаллоносителях PLCC (Plastic Leaded Chip Carrier), которые благодаря субмикронной технологии их изготовления обеспечивали небывалые функциональные возможности и быстродействие. По тем же причинам перспективными компонентами являются кристаллодержатели на гибкой ленте-носителе TAB (Tape Automatic Bonding).

Важно отметить, что потенциальные возможности ТПМ не могут быть реализованы, если приоритет не отдается проблемам технологичности конструкторских решений. Это хорошо понимают в производственных условиях, но еще предстоит осознать на управленческом уровне, с тем чтобы осуществить требуемую координацию. Необходимость такой психологической перемены часто подчеркивается, однако в осуществлении ее немало трудностей.

### 17.2.1. Достоинства микрокорпусов

Термин "технология поверхностного монтажа" является общим обозначением нового направления в области электроники, включающего и технику корпусирования компонентов. Навесные компоненты, предназначенные для поверхностного монтажа, в основном намного меньше, чем их традиционные эквиваленты, монтируемые в отверстия. Вместо длинных выводов или штырьков, как у корпусов, монтируемых в отверстия, они имеют очень короткие выводы или просто внешние контактные площадки. Такие компоненты непосредственно закрепляются на верхней (или нижней) стороне коммутационной платы при совмещении их выводов или внешних контактов с контактными площадками. Малые размеры компонентов для ТПМ обеспечивают:

- повышение плотности компоновки, так как многие компоненты, предназначенные для монтажа, имеют шаг расположения контактных площадок, равный 1,25 или 0,625 мм, и их можно монтировать на двух сторонах платы;
- увеличение числа выводов корпуса (например, пластмассовый кристаллоноситель PLCC имеет 84 вывода) и, следовательно, повышение функциональных возможностей на единицу поверхности коммутационной платы;
- повышение надежности межсоединений.

Применение корпусов с короткими выводами или внешними контактными площадками способствует также уменьшению величины паразитных индуктивностей, что особенно важно, например, в СВЧ устройствах. Кроме того для таких корпусов не требуется формовка и обрезка выводов, хотя обеспечение их копланарности все еще остается проблемой. Конструирование изделий с поверхностным монтажом может быть довольно гибким: возможны смешанные варианты конструкторско-технологической реализации с использованием компонентов для ТПМ и компонентов для установки в отверстия.

Отмечая преимущества конструкции, разработанной на базе ТПМ, не следует умалчивать о сложном комплексе проблем, возникающих на этапе ее производства. Появление компонентов для ТПМ способствовало осуществлению и развитию процесса автоматизированной сборки. Но по мере перехода от простых чипов резисторов и конденсаторов к сложным корпусам ИС проблемы установки компонентов, пайки, проверки, испытаний и ремонта вылились в сложную систему технологических ограничений.

### 17.2.2. Технологичность

Поверхностный монтаж допускает высокоскоростную автоматическую установку компонентов с частотой появления дефектов  $(100-1000) \cdot 10^{-6}$  в зависимости от сложности конструкции корпуса. Чип-резисторы и конденсаторы имеют огромное преимущество перед их аналогами для монтажа в отверстия:

- компоненты всех номиналов размещаются в корпусах только трех типоразмеров, чем обеспечивается эффективная стандартизация;
- стандартизация корпусов позволяет использовать быстродействующие монтажные автоматы с реально производительностью более 10000 компонентов в час;
- пайка двойной волной припоя (хорошо известная и давно освоенная технология) может быть эффективно использована для ТПМ;
- снижаются затраты на изготовление ПП из-за устранения операций сверления монтажных отверстий, их очистки, металлизации и контроля;
- исключаются такие подготовительные операции при сборке, как выпрямление, обрезка, формовка выводов.

Недостаток коммутационных плат для ТПМ заключается в том, что:

- они менее удобны, чем традиционные, для проверки, испытаний и ремонта;

- многовыводные корпуса требуют проектирования узких коммутационных дорожек с малым шагом между ними (0,625 мм) и, если не оптимизированы условия пайки, могут возникнуть проблемы, связанные с образованием перемычек припоя между соседними проводящими дорожками и выводами. В любом случае существуют некоторые ограничения, налагаемые, например, в отдельных случаях на пайку компонентов волной припоя или погружением, либо на методы пайки расплавлением дозированного припоя;
- для большинства коммутационных плат весьма трудно осуществить эффективную визуальную проверку качества пайки, поскольку выводы компонентов могут быть частично или полностью скрыты телом самого компонента. В то же время использование топологии платы, обеспечивающей осмотр каждого соединительного узла за пределами периметра корпуса компонента, неизбежно привело бы к неэффективному использованию рабочего поля платы. Таким образом, необходимо тщательно прорабатывать вопросы испытания изготовленных плат. Применение для этих целей испытательных зондов чаще всего неэффективно из-за слишком малого расстояния между выводами и коммутационными дорожками.

### 17.2.3. Отвод тепла

Проблема теплоотвода, по-видимому, одна из наиболее распространенных и трудных в количественной оценке для изделий с применением ТПМ. Вследствие малого расстояния между компонентами количество тепла, выделяемое компонентами на единицу площади платы, существенно увеличивается, поэтому при разработке конструкции платы отвод тепла должен обязательно учитываться. Для улучшения теплоотвода можно использовать, например, платы на основе инвара, плакированного медью, хотя они дороже и массивнее обычных стеклоэпоксидных плат, которые также используются в ТПМ. Несогласованность коэффициентов теплового расширения контактирующих материалов платы и корпуса компонента приводит к усталостным напряжениям и развитию дефектов в местах пайки вследствие постоянного термоциклирования, связанного с цикличностью работы устройств. В конечном итоге может развиться обширное коробление и плата или компонент разрушится.

## 17.3. Компоненты и корпуса ТПМ

В настоящее время на рынке имеется достаточно большое количество компонентов и корпусов ТПМ. Рассмотрим основные их типы.

### 17.3.1 Корпуса пассивных компонентов.

Для резисторов и конденсаторов чаще всего используются безвыводные корпуса прямоугольной формы (чип-корпуса). Они различаются стоимостью, габаритными размерами, рабочим напряжением (или рассеиваемой мощностью) и материалом диэлектрика (для конденсаторов). Для указания геометрических размеров таких корпусов используется краткая форма обозначения, например 1206 означает, что компонент имеет длину 0,12 дюйма (3,048 мм) и ширину 0,6 дюйма. Эти величины могут отличаться от изготовителя к изготовителю. Контактные поверхности у таких компонентов выполняются по торцам прямоугольного параллелепипеда.

Для резисторов типоразмер 1206 является практически промышленным стандартом. В Японии наряду с ним используются корпуса типоразмеров 0805 и 1608. Типичными характеристиками для этих элементов являются следующие:

- номинальная рассеиваемая мощность от 0,125 до 0,25 Вт при 70<sup>0</sup>С;

- номинальное напряжение 200 В (пост. ток);
- допуск на номинал резистора и ТКЛР: 1 % при  $1 \cdot 10^{-4}$  град<sup>-1</sup> и 5% при  $2 \cdot 10^{-4}$  град<sup>-1</sup>;
- диапазон сопротивлений от 10 Ом до 2,2 МОм.

Керамические многослойные конденсаторы особенно для среднего диапазона емкости так же выпускаются в корпусах 1206. Используются также корпуса 1210, 0805 и 1812. В некоторых конструктивных исполнениях существуют также оксидные электролитические конденсаторы. Рабочие напряжения для конденсаторов составляют 50, 100 В.

Еще одним типом корпуса для пассивных компонентов является MELF (Metal Electrode Face Bonded) с смонтированными электродами в виде металлизированных торцов. Эти элементы напоминают слегка измененный, безвыводной вариант стандартного цилиндрического резистора или конденсатора. В таких корпусах изготавливают кремниевые диоды, высокочастотные катушки индуктивности, танталовые конденсаторы, металлопленочные резисторы, но в наибольших объемах производят постоянные керамические конденсаторы и графитовые пленочные резисторы. В типичном случае керамический конденсатор в корпусе MELF имеет диапазон емкости 1-22000 пФ при рабочем напряжении 50 В. Для резисторов типовая мощность рассеивания 0,125 Вт. Стандартные типоразмеры таких компонентов обычно рассчитаны на такую же топологию контактных площадок, что и компоненты с выводами.

### 17.3.2. Корпуса активных компонентов

Для транзисторов, как правило, используются миникорпуса SOT - Small Outline Transistor. Имеется два стандартных корпуса, которые можно использовать для герметизации простых полупроводниковых приборов (т.е. одиночных биполярных и полевых транзисторов, диодов, стабилитронов и др.). Это корпуса TO-236 (SOT-23), применяемый при мощности рассеивания до 200 мВт и TO-243 (SOT-89) для мощности до 500 мВт. Оба корпуса имеют простую прямоугольную форму с выводами по торцам. У TO-236 выводы располагаются на противоположных сторонах корпуса, в то время как у TO-243 они расположены с одной стороны корпуса.

Интегральная схема в мини-корпусе SO (Small Outline) напоминает уменьшенный вариант традиционного корпуса типа DIP. Обычно мини-корпуса поставляются в 8-, 14- и 16-выводном исполнении, при этом выводы имеют форму крыла чайки и расположены с шагом 0,05 дюйма (1,27 мм). По сравнению с корпусом DIP мини-корпус на 70% меньше по объему и на 30% меньше по высоте. Его масса составляет лишь 10% от массы аналога. Кроме того мини-корпус имеет лучшие характеристики по прохождению сигналов. В таких корпусах выпускаются микросхемы малой и средней степени интеграции. Мини-корпус SO имеет ширину 0,150 дюйма (3,81 мм), а аналогичный по конструкции, но несколько больший по размерам SOL (Small Outline Large) - 0,300 дюйма (7,62 мм). Количество выводов у корпусов SOL колеблется от 16 до 28.

Следующим, более сложным конструктивным уровнем компонента является пластмассовый кристаллоноситель с выводами PLCC (Plastic Leaded Chip Carrier). Он имеет выводы, размещенные по всем четырем сторонам корпуса и обеспечивает непревзойденные функциональные возможности в пересчете на один квадратный дюйм. Проекция PLCC представляет практически правильный квадрат и имеет от 18 до 84 выводов, хотя в ряде исполнений 18-выводной вариант имеет форму прямоугольника. Шаг выводов обычно 0,050 или 0,025 дюйма, хотя для некоторых сложных СБИС используется шаг 0,020 дюйма (0,508 мм). Варианты конструкции с числом выводов до 52 имеют, как правило, гибкие J-образные выводы, загибаемые под корпус. Такая конфигурация весьма удобна для массового производства, поскольку исключает повреждение корпуса при монтаже, но нерешенной остается проблема копланарности выводов.

Наиболее распространенным типом керамических корпусов для поверхностного монтажа является LCCC (Leadless Ceramic Chip Carrier) - безвыводной керамический кристаллоноситель. Варианты его конструкции имеют от 18 до 84 выводных контактных площадки. Обычно этот корпус представляет собой конструкцию состоящую из трех элементов: металлизированного керамического основания, металлизированной крышки и герметизирующего материала (специального припоя). Главной проблемой при использовании PLCC является рассогласование ТКЛР корпуса и стандартной стеклоэпоксидной платы, что может привести к разрушению пайки при жестком термоциклировании.

### 17.3.3. Коммутационные платы для ТПМ

Техника поверхностного монтажа революционизирует методы конструирования и изготовления коммутационных плат. Попытки обеспечить интенсивный теплоотвод, являющийся основной проблемой ТПМ, объясняют появление большого количества новых пластмасс, керамических и композиционных материалов для плат. Становятся обычными печатные дорожки, имеющие ширину и шаг, равные 0,008 дюйма (0,203 мм), а в весьма близком будущем потребуются платы с шириной дорожек 0,005 дюйма (0,127 мм). Большинство печатных плат, предназначенных для монтажа в отверстия, изготавливают по традиционной технологии с шириной дорожек 0,01-0,015 дюйма (0,254-0,381 мм). Вместе с тем техника поверхностного монтажа предъявляет повышенные требования к электрофизическим параметрам плат. Так, допустимый для традиционной платы допуск на полное сопротивление, равный +25%, становится неприемлемым для плат ТПМ, где он не должен превышать +5%. Это требует включения резистивных нагрузок в конструкцию самой платы. Следует отметить, что при изготовлении простых и относительно дешевых сборок полностью пригодны традиционные материалы, такие как слоистые бумажнофенольные (гетинаксы) и стеклоэпоксидные (стеклотекстолиты) материалы. Часто изготовление подобных сборок становится дешевле как бы само по себе, поскольку исключается сверление сквозных монтажных отверстий. По оценкам экспертов это удешевляет производство печатных плат примерно на 10 %.

Но поистине вызовом, который бросает ТПМ изготовителям плат, являются требования к точности их изготовления - допуски для плат ТПМ должны составлять от 0,001 до 0,002 дюйм (0,0254-0,0508 мм).

### 17.4. Особенности процессов в ТПМ

С точки зрения технологии микросборки ТПМ отличаются от традиционных в нескольких отношениях:

- корпуса компонентов для поверхностного монтажа не закрепляются на поверхности платы с помощью выводов и поэтому нуждаются в механическом креплении на плате с помощью эпоксидных клеев или припойной пасты. После размещения компонентов на плате осуществляется отверждение эпоксидной смолы непосредственно перед пайкой;
- пайка волной припоя применима только к простым корпусам компонентов ТПМ, устанавливаемым на обратной стороне платы, и к теплостойким элементам. Компоненты на лицевой стороне платы должны припаиваться с применением одного из методов оплавления дозированного припоя: в парогазовой среде, с помощью ИК- или лазерного нагрева;
- при смешанных методах монтажа производственная линия должна включать манипуляторы для переворачивания плат и, как минимум, две установки пайки;
- до проведения пайки изделия с компонентами должны перемещаться от операции к операции с использованием прецизионных автоматизированных транспортных средств со специальными накопителями, обеспечивающими целостность компонентов и сохранение их позиции на плате с высокой точностью.

Существует 3 основных варианта реализации поверхностного монтажа:

Чисто поверхностный монтаж (односторонний или двухсторонний). В этом случае число технологических операций минимально. На заготовку платы методами трафаретной печати (сеткографии) наносят припойную пасту. Количество припоя должно обеспечивать требуемые электрофизические параметры коммутирующих элементов (для чего необходим соответствующий контроль). После осуществления позиционирования и фиксации компонентов следует операции пайки оплавлением дозированного припоя. В случае двухстороннего монтажа на обратной стороне платы фиксируются простые компоненты с помощью адгезива. После отверждения адгезива компоненты подвергаются пайке двойной волной припоя, либо оплавлением дозированного припоя, затем осуществляется очистка, контроль и испытания смонтированных печатных плат.

Смешанно-разнесенный монтаж, когда традиционные компоненты размещают на лицевой стороне платы, а простые компоненты для ТПМ - на обратной. Существуют две разновидности реализации этого варианта монтажа. Чаще всего сборку начинают с установки традиционных компонентов в отверстия платы, после чего размещают компоненты ТПМ. В альтернативном случае сначала устанавливают компоненты ТПМ. Первый вариант применяется тогда, когда формовка и вырубка выводов обычных элементов осуществляется с помощью специальных приспособлений заранее, иначе компоненты ТПМ будут затруднять обрезку выводов. Компоненты ТПМ целесообразно монтировать первыми при повышенной плотности их размещения, что требует минимального количества переворотов платы в процессе изготовления изделия. Соединение элементов с платой осуществляется пайкой двойной волной припоя.

Смешанный монтаж, когда на лицевой стороне монтируются и традиционные компоненты и компоненты ТПМ, а на обратной (не обязательно) простые компоненты ТПМ. Первым этапом является нанесение припойной пасты через трафарет, установка на лицевой стороне компонентов ТПМ и пайка расплавлением дозированного припоя. Затем после установки традиционных компонентов (с соответствующей обрезкой и фиксацией выводов), плата переворачивается, на нее наносится адгезив и устанавливаются компоненты простых форм для поверхностного монтажа (чип компоненты и компоненты в корпусе SOT). После фиксации адгезива плата переворачивается и пропаивается двойной волной припоя. Следует отметить, что в таком технологическом варианте возрастает количество технологических операций из-за сложности сборки при наличии компонентов на обеих сторонах печатной платы. Неизбежно также возрастает количество паянных соединений и трудности обеспечения их качества. Это усложняет работу автоматического оборудования для контроля соединений, поскольку за один прием можно проконтролировать лишь одну сторону платы.

В период перехода от монтажа в отверстия к ТПМ, на платах чаще всего устанавливаются компоненты смешанного состава в корпусах как того, так и другого типа, возможно, на обеих сторонах платы. Это наиболее сложный тип сборки. Обычно требуется не менее двух лет, чтобы полностью овладеть этой новой техникой и достичь высокого уровня выхода годных.

## 5. Литература по теме

1. Мэнгин Ч.-Г., Макклелланд С. Технология поверхностного монтажа: Пер с англ.- М.: Мир, 990.-276 с.
2. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры: Уч. для вузов/Под ред. А.П. Достанко и Ш.М. Чабдарова.-М.: Радио и связь, 989. -624 с.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Стадии и этапы разработки РЭС. /2, с. 65-76; 1, с. 25-29/.
2. Понятие конструкции и конструирования. Эволюция конструкций РЭС. /1, с. 5-11, 14-23; 2, с. 6-10/.
3. Структура конструкций РЭС. Основные задачи конструирования. /2, с. 10-23; 1, с. 8/
4. Основные требования, предъявляемые к РЭС. Кодификация климатических исполнений и объекта установки. /2, с. 23-55; 1, с. 334-335/
5. Классификация РЭС по категориям, классам и группам. Особенности наземных РЭС. /2, с. 55-59; 1, с. 335-398/
6. Особенности морских РЭС. /2, с. 59-62/
7. Особенности бортовых РЭС. /2, с. 62-65; 1, с. 398-420/
8. Понятие конструкторской документации. Роль стандартизации в проектировании и производстве РЭС. /1, с. 52-55/
9. Классификация и комплектность конструкторской документации. /2, с. 88-97/
10. Назначение и структура спецификации. /ГОСТ 2.108-68/
11. Печатные платы. Основные понятия. Классификация. Материалы /1, 90-103; 3, с. 224-229, 236-241/
12. Методы изготовления печатных плат. /1, с. 92-100; 3, с. 229-236/
13. Печатно-проводные платы. /3, с. 333-337/
14. Автоматизация конструкторских работ. САПР P-CAD. Назначение и возможности. /6/
15. Последовательность проектирования печатных плат в пакете P-CAD. /6/
16. Работа с графическим редактором PC-CAPS. /6/
17. Структура библиотек в пакете P-CAD и работа с ними. /6/
18. Размещение элементов на поверхности печатной платы и трассировка проводников в пакете P-CAD. /6/
19. Понятие теплового режима РЭС. Механизмы теплообмена. /1, с. 154-170; 2, с. 297-298/
20. Основные схемы СОТР и их возможности. Выбор СОТР. /2, с. 301-307; Метод. указ. к лаб. раб. 4/
21. Расчет тепловых режимов блоков РЭС. /Метод. Указания к лаб. раб. 4/
22. Влияние радиоактивных излучений на параметры РЭС и защита от них. /4, с. 219-223/
23. Основные понятия выборочного контроля качества. /5/
24. Принципы построения плана выборочного контроля качества. /5/
25. Контроль качества методом однократной выборки. /5/
26. Производственный и технологический процесс. Типы производства. /3, с. 10-14/
27. Особенности РЭС в производстве. Технологическая подготовка производства. ЕСТПП. /3, с. 14-17, 5-9/
28. Технологическая документация. ЕСТД. /7, с. 26-28/
29. Основные виды технологических процессов, используемых в производстве РЭС и их оснащение. /3, с. 17-20/
30. Принципы организации технологических процессов сборки и монтажа РЭС. /3, с. 155-157/
31. Особенности проектирования технологического процесса сборки и монтажа. /3, с. 157-165/
32. Сборка и монтаж печатных узлов. /3, с. 310-324/
33. Общая сборка и монтаж РЭС. Контроль и технологическая тренировка. /3, с. 371-375/
34. Основные преимущества монтажа на поверхность. /3, с. 324-326/

35. Компоненты для монтажа на поверхность - конструктивные и технологические особенности.
36. Варианты технологических процессов монтажа на поверхность. /3, с. 326-333/

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств: Учеб. для вузов. - М.: Высш. шк.,1990.-32 с.
2. Гелль П.П., Иванов-Есипович Н.К. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. для вузов. -Л.: Энергоатомиздат,1984.-36 с.
3. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. для вузов/ Под ред. А.П. Достанко, Ш.М. Чабдарова. - М.: Радио и связь,1989 г.
4. Глудкин О.П. Методы и устройства испытаний РЭС и ЭВС. Учеб. для вузов.- М.: Высш. шк.,1991. -36 с.
5. Ефремов Г.С., Забегалов Б.Д. Теоретические основы статистического контроля качества и испытаний РЭА. - Горький: Госуниверситет,1977.
6. Сучков Д.И. Проектирование печатных плат в САПР РСAD 4.50: Учеб.-метод. пособие. -Обнинск: Микрос,1992. -475 с.
7. Ушаков Н.Н. Технология производства ЭВМ: Учеб. для вузов. -М.: Высш. шк.,1991. -416 с.