

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

В.А. ЗЕЛЕНСКИЙ

ОСНОВЫ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по программе высшего образования по направлению подготовки 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств

САМАРА
Издательство СГАУ
2016

УДК 621.396 (075)
ББК 30.61я7
3-486

Рецензенты: д-р техн. наук, доц. А.И. Д а н и л и н ,
д-р пед. наук, канд. техн. наук, доц. В.В. А н д р е е в а

Зеленский В.А.

3-486 Основы конструкторско-технологического проектирования радиоэлектронных средств: учеб. пособие / В.А. Зеленский. – Самара: Изд-во СГАУ, 2016. – 80 с.: ил.

ISBN 978-5-7883-1067-1

Изложены общие принципы конструкторского и технологического проектирования радиоэлектронных средств, вопросы их надёжности, качества и стабильности параметров в процессе эксплуатации. Рассмотрены вопросы применения стандартов в процессе проектирования, особенности работы аппаратуры в условиях воздействия дестабилизирующих факторов, практические аспекты расчёта надёжности.

Содержание учебного пособия соответствует тематике лекций для бакалавров по дисциплине «Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности», читаемых автором в Самарском государственном аэрокосмическом университете.

Предназначено для студентов направления подготовки 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств.

УДК 621.396 (075)
ББК 30.61я7

ISBN 978-5-7883-1067-1

© СГАУ, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1. КОНСТРУКТОРСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЭС	9
1.1. Классификация РЭС	9
1.2. Требования к конструкциям РЭС	12
1.3. Методы конструирования РЭС	14
1.4. Стадии разработки РЭС	16
1.5. Влияние внешней среды на параметры РЭС	19
1.6. Элементная база РЭС	22
1.7. Материалы для элементов конструкций РЭС	23
2. СОЕДИНЕНИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ РЭС	26
2.1. Компоновка элементов РЭС	26
2.2. Виды соединений и методы монтажа	28
2.3. Печатные платы	30
3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЭС	40
3.1. Основные понятия и определения	40
3.2. Виды производственных процессов	41
3.3. Структура и классификация технологических процессов	42
3.4. Разработка технологического процесса	44
3.5. Технологичность конструкции РЭС	46
4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РЭС	48
4.1. Обработка деталей точением	48
4.2. Обработка сверлением	50
4.3. Холодная штамповка	51
4.4. Технология изготовления деталей из пластмасс	53
4.5. Электрофизические и электрохимические методы	55
4.6. Технология пайки	57
5. НАДЁЖНОСТЬ РЭС	61
5.1. Общие сведения о надёжности	61
5.2. Показатели безотказности невосстанавливаемых изделий	64
5.3. Способы повышения надёжности РЭС	68
5.4. Автоматизированный расчёт надёжности РЭС	71
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	77

ПРЕДИСЛОВИЕ

Невозможно представить современную жизнь без радиоэлектроники. Создание РЭС базируется на принципах автоматизированного конструкторского проектирования, высокой технологичности изделий, предполагает микроминиатюризацию, использование современной элементной базы и перспективных материалов, учитывает высокие эргономические и экологические требования. Привлекательность для массового потребителя обеспечивается надёжностью РЭС, изысканным техническим дизайном и доступной стоимостью. К радиоэлектронным устройствам специального назначения (оборонная промышленность, атомная энергетика, авиация, космос) предъявляются более высокие требования к функциональности, надёжности и качеству, чрезвычайно важна способность работать в условиях влияния внешних дестабилизирующих факторов.

Упомянутые обстоятельства обуславливают необходимость подготовки высококвалифицированных специалистов в области конструирования и технологии радиоэлектронных средств, чему, по мнению автора, будет способствовать данное учебное пособие.

Содержание книги соответствует тематике лекций для бакалавров направления подготовки «Конструирование и технология электронных средств» по дисциплине «Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности», читаемых автором в Самарском государственном аэрокосмическом университете. Вопросы, затронутые в учебном пособии, могут быть интересны магистрантам и аспирантам.

Глубокую благодарность автор выражает доктору технических наук, доценту, заведующему кафедрой радиотехники Самарского государственного аэрокосмического университета А.И. Данилину и доктору педагогических наук, кандидату технических наук, доценту, профессору кафедры математических методов и информационных технологий Самарской академии государственного и муниципального управления В.В. Андреевой за полезные замечания, сделанные при рецензировании рукописи.

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

БИС – большая интегральная схема;
БД – база данных;
ЕСДП – единая система допусков и посадок;
ЕСКД – единая система конструкторской документации;
ЕСПД – единая система программной документации;
ЕСТД – единая система технологической документации;
ИМС – интегральная микросхема;
КД – конструкторский документ;
НИР – научно-исследовательская работа;
ОКР – опытно-конструкторская работа;
ПП – печатная плата;
РЭА – радиоэлектронная аппаратура;
РЭС – радиоэлектронные средство;
САПР – система автоматизированного проектирования;
СБИС – сверхбольшая интегральная схема;
СУБД – система управления базами данных;
ТД – технологический документ;
ТЗ – техническое задание;
ТП – технологический процесс;
УНЧ – усилитель низкой частоты;
УФЭ – устройство функциональной электроники.

ВВЕДЕНИЕ

Под техническим проектированием обычно понимают создание описаний нового или модернизируемого технического объекта, достаточных для его изготовления в заданных условиях [27].

Различают следующие виды проектирования:

- схмотехническое;
- конструкторское (конструирование);
- технологическое.

Если речь идёт о разработке системы, к этим трём основным видам добавляют системотехническое проектирование [22].

Конструирование производится с целью создания радиоэлектронных средств (РЭС), удовлетворяющих определённым запросам потребителей. Несмотря на разнообразие существующей аппаратуры, обычно ко всем РЭС предъявляются требования функциональности, надёжности, эргономичности, оптимальных массогабаритных параметров и стоимости [9, 10]. Данных требований можно достичь при выполнении следующих условий:

- применение автоматизированных методов проектирования, основанных на системном подходе, моделировании и применении передовых информационных технологий;
- применение современных материалов и технологий, повышение технологичности изделий радиоэлектроники;
- использование способов и технических средств защиты от внешних дестабилизирующих факторов;
- обеспечение комплексной микроминиатюризации.

Решение задач микроминиатюризации начинается с формирования технических требований к проектируемому изделию – снижение массы, габаритных характеристик, энергопотребления. Данное решение осуществляется на всех направлениях проектирования – схмотехническом, конструкторском, технологическом. Конструкторское решение подразумевает:

- выбор структуры РЭС;
- выбор элементной базы;
- выбор материалов.

При выборе структуры РЭС по критерию микроминиатюризации предпочтение отдаётся использованию больших и сверхбольших интегральных схем (БИС, СБИС), а также элементов оптоэлектроники и волоконной оптики. При выборе материалов для несущих конструкций предпочтение отдаётся лёгким и прочным, например, алюминиевым и магниевым сплавам, пластмассам. При выборе элементной базы важно исходить из требований стандартизации и унификации. Тем самым повышается технологичность конструкции РЭС.

Таким образом, все три направления проектирования РЭС – схемотехническое, конструкторское и технологическое тесно связаны между собой.

Как и всякая область знания, радиоэлектроника оперирует своими терминами и понятиями, которые необходимо знать каждому специалисту. В частности, рассмотрим основные определения, касающиеся конструкторского и технологического проектирования РЭС.

Изделие, согласно ГОСТ 2.101 – 68, – любой предмет производства (или набор предметов), подлежащий изготовлению на предприятии. Изделия основного производства предназначены для поставки (реализации). Изделия вспомогательного производства используются как составные части изделий основного производства или для создания изделий основного производства (например, инструмент).

Виды изделий: деталь, сборочная единица, комплекс, комплект.

Деталь – изделие, изготовленное из однородного наименования материала без применения сборочных операций.

Сборочная единица – изделие, составные части которого подлежат соединению на предприятии сборочными операциями.

Комплект – два или более изделия, соединенные сборочными операциями, которые имеют общие эксплуатационные назначения вспомогательного характера.

Комплекс – два или более изделия, не соединенные сборочными операциями, предназначенные для выполнения взаимосвязанных функций.

Система – это комплекс технических средств, управляемый оператором-человеком (в ручном или полуавтоматическом режиме работы) или контролируемый, или запускаемый оператором (в автоматическом режиме работы).

Конструкция РЭС – пригодная для повторения в производстве совокупность деталей и материалов с различными физическими свойствами, находящихся в определенной энергетической и пространственной связи, обеспечивающая выполнение заданных функций с необходимой

точностью и надежностью под влиянием внешних и внутренних воздействий.

Конструкция РЭС отличается рядом особенностей, выделяющих её в отдельный класс среди других конструкций:

- 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 принятия мер защиты, применения термочувствительных элементов;
- слабой связью внутренней структуры конструкции с её внешним оформлением.

Конструирование РЭС – процесс выбора структуры пространственных и энергетических связей внутри и вне РЭС, приводящий к установлению норм и правил его изготовления и эксплуатации. Целью конструирования является разработка комплекта проектных и рабочих конструкторских документов (КД) по ГОСТ 2.101–68 и ГОСТ 2.109–68, на основе которых осуществляется технологическая подготовка производства, разработка технологической документации (ТД), изготовление РЭС, его испытания и эксплуатация.

Технологический процесс (по ГОСТ 3.1109–82) 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, термической обработки, процессы нанесения покрытий, сборки, монтажа, контроля РЭС). Технологический процесс является частью *производственного процесса*. Группа международных стандартов *ISO* выделяет при вида производственных процессов: основной (технологический) процесс, процессы обеспечения, процессы управления.

1. КОНСТРУКТОРСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЭС

1.1. Классификация РЭС

РЭС различают по классам и группам использования (рис.1.1), конструктивному исполнению, функциональному назначению, продолжительности работы, принципу действия, надежности, способу эксплуатации, типу технического обслуживания, элементной базе, типу производства [1, 2].

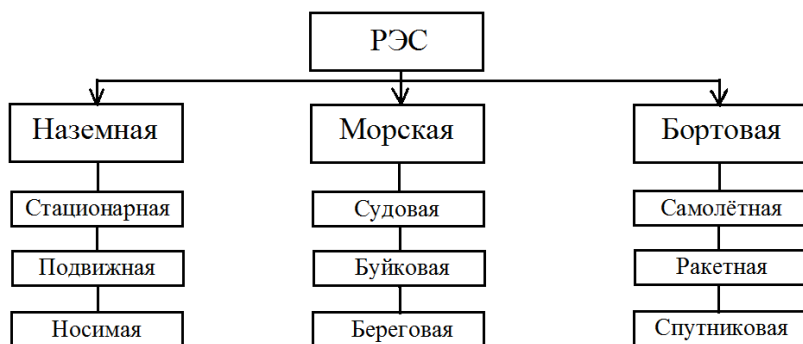


Рис. 1.1 – Классификация РЭС по классам и группам исполнения

Классы подразделяют РЭС по трём зонам использования – наземная, морская, бортовая (воздушное и космическое пространство). Каждой из этих зон соответствуют свои условия эксплуатации (табл. 1.1). Класс наземных РЭС состоит из трёх основных групп – стационарная, подвижных объектов, носимая; при этом каждая из них включает подгруппы бытовой и профессиональной РЭС. Класс морской профессиональной РЭС содержит три группы – судовую, береговую и буйковую. Класс бортовых профессиональных РЭС включает три группы – самолётную (вертолётную), ракетную и космическую.

По функциональной сложности различают (согласно ГОСТ 26632 – 85) следующие уровни разукрупнения РЭС:

- радиоэлектронное устройство;

- радиоэлектронный комплекс;
- радиоэлектронную систему.

**Таблица 1.1. Климатические факторы,
воздействующие на различные классы РЭС**

Климатические факторы		Диапазон воздействия на РЭС		
		Наземные	Морские	Бортовые
Диапазон температур, °С	рабочий	-40...50	-40...60	-60...110
	предельный	-40...60	-40...65	-90...260
Относительная влажность при температуре 25 ⁰ , %		80...93	98...100	93...100
Акустические шумы при частоте 50-1000 Гц, дБ		85...125	75...140	130...150
Атмосферное давление, кПа	максимальное	57	88	2
	минимальное	106	106	106

При этом под *радиоэлектронным устройством* понимают функционально законченную сборочную единицу, выполненную на несущей конструкции, реализующую функцию приёма, передачи и преобразования информации [3, 11].

Радиоэлектронный комплекс представляет собой совокупность функционально связанных радиоэлектронных устройств, предназначенных для решения сложных технических задач.

Радиоэлектронная система представляет совокупность функционально взаимодействующих автономных радиоэлектронных комплексов и устройств, обладающих свойством перестраивания структуры в целях рационального выбора и использования входящих средств для выполнения технических задач.

По функциональному назначению можно выделить следующие виды РЭС, имеющие существенные конструктивные особенности:

- бытовая РЭС: радиовещательные приемники, тюнеры, телевизионные приёмники; видеоманитофоны, диктофоны, комбинированные устройства;
- профессиональная РЭС: системы радиосвязи; контрольно-измерительная аппаратура;
- медицинская аппаратура;
- студийная звуко- и видеозаписывающая и воспроизводящая аппаратура;

- специализированная вычислительная техника для приёма, хранения, обработки и выдачи информации.

По конструктивной сложности различают четыре структурных уровня разукрупнения: РЭС-3, РЭС-2, РЭС-1, РЭС-0 (ГОСТ Р 52003-2003. Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств. Термины и определения).

Радиоэлектронный модуль третьего уровня (РЭМ-3) – это функционально законченный радиоэлектронный шкаф, пульт, стойка, выполненные на основе базовой несущей конструкции и функциональной взаимозаменяемости. Модуль второго уровня (РЭМ-2) – это блок или рама. Модуль первого уровня (РЭМ-1) – это ячейка, плата. Модуль нулевого уровня (РЭМ-0) конструктивно совместим с модулем первого уровня и реализует преобразование информации или сигналов. Обычно это элементы (ЭРЭ, ИМС, СБИС, элементы функциональной электроники), не имеющие самостоятельного эксплуатационного применения (рис.1.2).

По продолжительности работы различают четыре категории РЭС: многократного, однократного, непрерывного и общего применения.

Аппаратура однократного применения используется один раз за весь период эксплуатации (например, ракетная), многократного применения – несколько раз.

Аппаратура непрерывного применения предназначена для непрерывной эксплуатации (например, радиотрансляционный узел), РЭС общего применения работают в смешанном режиме (бытовая РЭС).

По надёжности различают РЭС восстанавливаемые и невосстанавливаемые, с резервированием и без резервирования.

По способу эксплуатации РЭС подразделяют на автоматические, полуавтоматические и с ручным управлением. Автоматизация повышает качество и скорость обслуживания, снижает эксплуатационные расходы.

Однако автоматизация не всегда оправдана, так как она существенно усложняет РЭС и увеличивает их стоимость.

По виду технического обслуживания (ТО) различают РЭС с ТО после периодического контроля, с ТО при непрерывном контроле и РЭС с регламентированным ТО, которое проводится независимо от состояния изделия к началу обслуживания. При этом под ТО понимают операцию или комплекс операций по поддержанию работоспособности при исправности изделия. Классификация по функциональному назначению

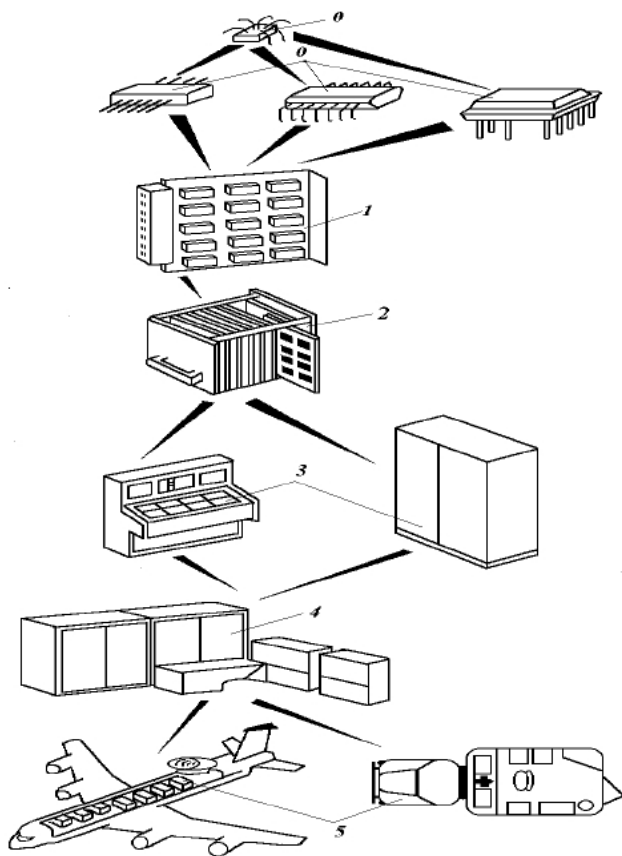


Рис. 1.2 – Классификация РЭС по конструктивной сложности

является основной, так как предопределяет объект установки, а значит и массу, форму, габариты, энергопотребление, стоимость, надежность, защиту от дестабилизирующих факторов.

1.2. Требования к конструкциям РЭС

Требования, предъявляемые к конструкциям РЭС, можно наглядно отобразить с помощью рис. 1.3. Тактико-технические требования содержатся в техническом задании (ТЗ) на разработку РЭС и включают в себя [13]:

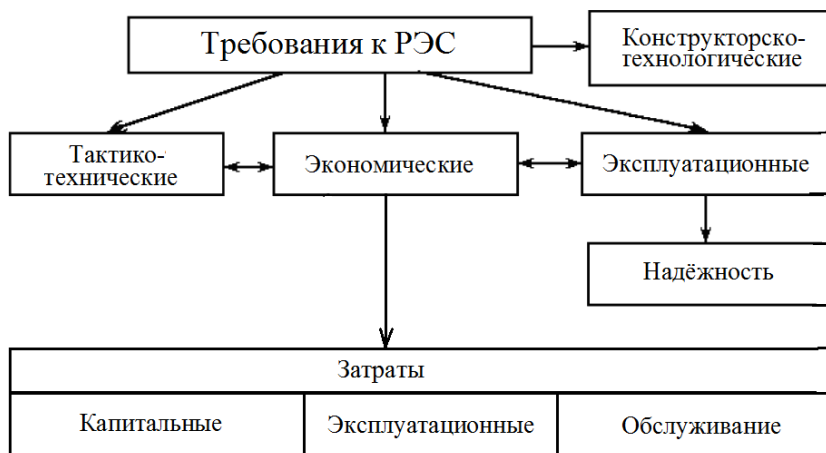


Рис. 1.3 – Требования к конструкциям РЭС

- функциональное назначение (прием, передача, обработка сигналов, индикация, внешние источники питания и т.д.);
- значения параметров, определяющих конструктивное решение (потребляемая мощность, частота, полоса пропускания и т.д.);
- объект установки;
- климатическое исполнение;
- массогабаритные характеристики;
- коммуникационные сети на объекте;
- электромагнитная защита на объекте (наличие одновременно работающих РЭС и их взаимное влияние, экранирование, устранение наводок).

Конструктивно-технологические требования включают:

- принципы построения конструкции изделий;
- технологичность;
- минимальную номенклатуру комплектующих изделий;
- меры защиты от климатических и механических факторов;
- ремонтпригодность.

Эксплуатационные требования сводятся к следующему:

- простота управления и обслуживания;
- наличие сигнализации опасных режимов работы (выход из строя, открытие дверей шкафов, обрыв заземления);

- наличие аппаратуры контроля и наладки;
- обеспечение нормальной работы оператора с учётом эргономики.

Требования надёжности включают обеспечение:

- вероятности безотказной работы;
- требуемой наработки на отказ;
- среднего времени восстановления работоспособности;
- долговечности и сохраняемости.

Для бытовой РЭС основным является показатель безотказности – средняя наработка на отказ $T_{\text{ср}}$. Значения этого показателя должны выбираться из ряда 3400, 3900, 4500, 5500, 6800, 7800, 9150, 11000, 13750, 18000, 27500 часов в соответствии с ГОСТ 21317–87 и ГОСТ 23262–88.

Для профессиональных РЭС средняя наработка на отказ устанавливается в зависимости от условий эксплуатации, категории размещения, сложности аппаратуры, типа элементной базы. Основным показателем для этой категории РЭС является вероятность безотказной работы.

К экономическим требованиям относят: минимально возможные затраты времени, труда и материальных средств на разработку, изготовление и эксплуатацию РЭС, минимальную стоимость изделия после освоения его в производстве.

Все перечисленные группы взаимосвязаны и оптимальное их удовлетворение представляет собой сложную инженерную задачу.

1.3. Методы конструирования РЭС

Конструирование современных РЭС основано на *базовом методе*. В основу данного метода положен принцип деления аппаратуры на функционально и конструктивно законченные части. В связи с этим в пределах базового метода выделяют его разновидности – узловой, функционально-модульный и функционально-блочный.

Базовый метод характеризуется следующими достоинствами:

- на этапе разработки позволяет вести работу над многими узлами и блоками, это упрощает разработку, сокращает её сроки;
- на этапе производства сокращает сроки освоения серийного производства аппаратуры, снижает стоимость аппаратуры;
- при эксплуатации повышает эксплуатационную надёжность РЭС, облегчает обслуживание, улучшает ремонтпригодность.

Выбор метода конструирования производится по результатам сравнительного анализа перечисленных методов с позиций назначения, надежности, технологичности, ремонтпригодности и стоимости РЭС.

Основой базового метода конструирования является многоуровневый принцип построения, то есть деление конструкции на части, которые находятся в иерархической подчиненности друг другу. Реализуется это с помощью уровней разукрупнения РЭС, габаритные размеры которых стандартизованы. Конструкции нижестоящего уровня совместимы с конструкциями вышестоящего уровня.

На рис. 1.4 показаны размеры блоков и способы их установки на монтажных рамах авиационных РЭС.

Оптимальным является ограничение номенклатуры блоков в аппаратуре любого вида. Такие блоки называются унифицированными. Основные размеры, условное обозначение, варианты конструкций унифицированных блоков – функциональных ячеек регламентированы ОСТ 4. Г0. 410.224–84. Основой ячейки является печатная плата с размерами 170x75, 170x110, 170x150, 170x200, 170x280, основными из которых являются 170x200. Вдоль стороны 170 (в системах управления и телекоммуникации) устанавливается электрический соединитель типа СНП34 и панель, предназначенная для крепления ячейки в составе базовой конструкции блока второго уровня. Минимальный шаг установки унифицированных ячеек в блоке равен 15 мм.

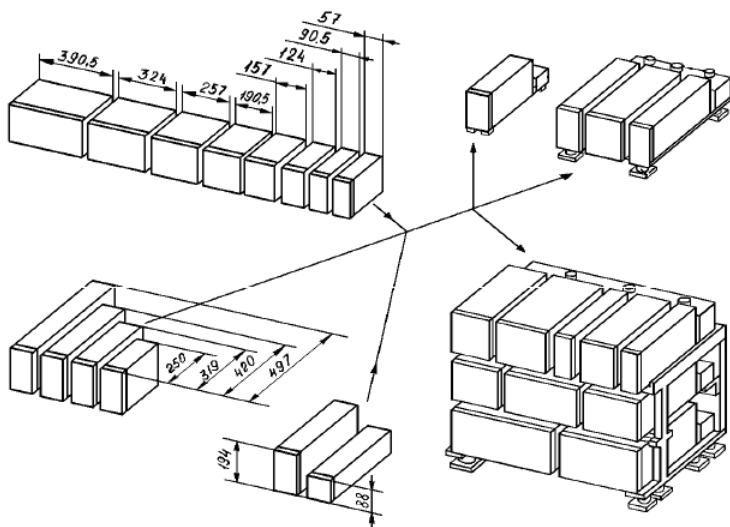


Рис. 1.4 – Размеры и установка блоков авиационных РЭС

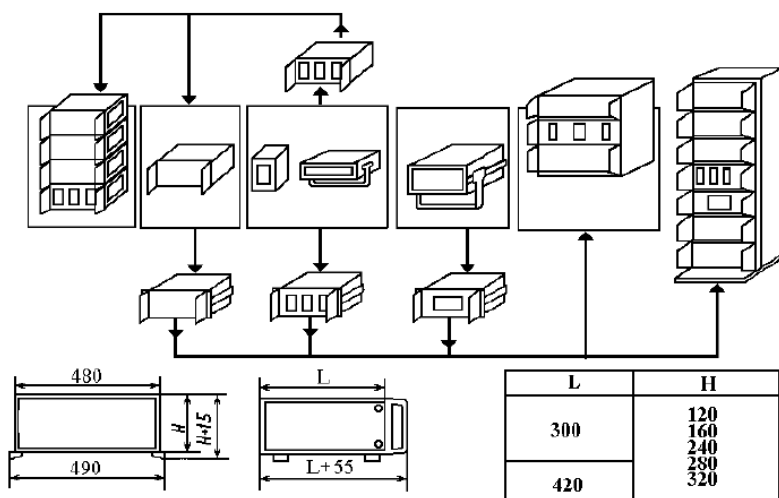


Рис. 1.5 – Размеры и установка блоков стационарных РЭС

На рис. 1.5 показаны размеры блоков и способы их установки для случая стационарной измерительной аппаратуры.

1.4. Стадии разработки РЭС

Конструирование РЭС представляет собой многостадийный процесс выбора и отражения в КД структуры, размеров, формы изделия в целом и отдельных его частей, функциональных связей между частями, материалов и методов изготовления, включая конструкторское сопровождение в производстве. Работа конструктора состоит из двух частей.

Первая часть – творческая, трудно поддающаяся формализации. Она заключается в поисках принципа действия конструкции, обеспечивающего требования технического задания (ТЗ). Вторая часть заключается в реализации этого принципа в конкретную форму в виде комплекта конструкторской документации (КД). Вторая часть может быть выполнена при поддержке систем автоматизированного проектирования (САПР).

Система автоматизированного проектирования состоит из комплекса технических, программных и организационных средств автоматизации [17]. В настоящее время существует большое количество

программных пакетов, автоматизирующих как отдельные конструкторские процессы (например, трассировку печатной платы), так и выполняющие полный комплекс конструкторских работ. Математическое обеспечение САПР отличается богатством и разнообразием используемых методов вычислительной математики, статистики, математического программирования, дискретной математики, искусственного интеллекта [24]. Программные комплексы САПР относятся к числу наиболее сложных современных программных систем, основанных на языках программирования *C++*, *Java* и других, реляционных и объектно-ориентированных системах управления базами данных (СУБД), стандартах открытых систем и обмена данными в компьютерных средах [31].

Процесс разработки изделия состоит из двух этапов – научно-исследовательской работы (НИР) и опытно-конструкторской работы (ОКР). На этапе НИР проводится предварительная аналитическая и расчётная проработка изделия. Результатом НИР является научно-технический отчёт, содержащий выводы о новых принципах построения изделия, научно-обоснованный подход к реализации этих принципов, анализ проведенных исследований. На этапе ОКР осуществляется инженерное воплощение теоретических результатов, полученных на этапе НИР, в схему и конструкцию изделия. НИР включает в себя стадии разработки ТЗ и технического предложения. ОКР включает стадии эскизного и технического проектирования, стадию разработки рабочей документации.

Техническое задание – основной документ, по которому разрабатывается конструкция. ТЗ составляется всеми заинтересованными сторонами, как правило заказчиком и исполнителем. Заявка на разработку содержит: назначение изделия, ориентировочная потребность в изделии, стоимость и сроки разработки, технико-экономическое обоснование, основные требования, предъявляемые к изделию, и условия эксплуатации. Порядок ТЗ регламентирует ГОСТ 15001 – 73.

Техническое предложение. На этой стадии проводятся следующие виды работ: выявляются варианты возможных решений, учитывая тенденции и перспективы развития отечественной и зарубежной науки и техники; проверяются патентная чистота, оформляются заявки на выдачу патента на изобретение или полезную модель; проверяется соблюдение техники безопасности. Проводится сравнительный анализ по всем показателям качества и выбирается наилучший.

Эскизное проектирование. На этой стадии выбранный вариант подвергается детальной проработке с целью выявления возможности наиболее полного удовлетворения всех поставленных требований. На этой стадии проводятся следующие виды работ: разрабатываются электрические схемы с разбивкой на блоки и узлы; изготавливаются отдельные макеты для отработки электрических принципиальных схем; выбирают необходимые несущие конструкции; проводится моделирование тепловых режимов.

Техническое проектирование. На этой стадии устанавливаются окончательные технические решения, дающие полное представление о разрабатываемом изделии и достаточные для разработки КД. На этой стадии проводится:

- детальная и окончательная отработка схемных и конструкторских решений, включая создание чертежей на все важные узлы, блоки и приборы;
- заканчивается проработка всех вопросов защиты от внешних воздействий, доступа при ремонте и контроле, привязки к объекту установки, расположению органов управления;
- выполняются необходимые макеты, подвергаемые испытаниям;
- предоставляется документация: пояснительная записка, сборочные чертежи, полный комплект электрических принципиальных схем, техническое описание блоков и РЭС в целом, инструкция по эксплуатации, программа и методика испытаний.

В отчёте по результатам ТП проводятся уточненные расчёты схем, обосновывается выбор конструкторских решений с расчётами (механической прочности, тепловых режимов, надежности и т.п.). ТП служит наиболее полным основанием для рабочего проектирования.

Рабочее проектирование. Различают три стадии рабочего проектирования: стадия опытного образца, стадия установочной серии, стадия серийного производства. Рабочее проектирование включает в себя разработку и коррекцию комплекта КД, изготовление опытного образца, установочной серии, испытание и доработку изделия. Опытный образец изготавливает предприятие-разработчик, а установочную серию – предприятие-изготовитель. В случае успешных испытаний установочной серии изделие поступает в серийное производство.

1.5. Влияние внешней среды на параметры РЭС

Факторы, воздействующие на работоспособность радиоэлектронных средств, группируются по следующим четырём классификационным признакам: климатические, биологические, механические и радиационные (рис. 1.6).

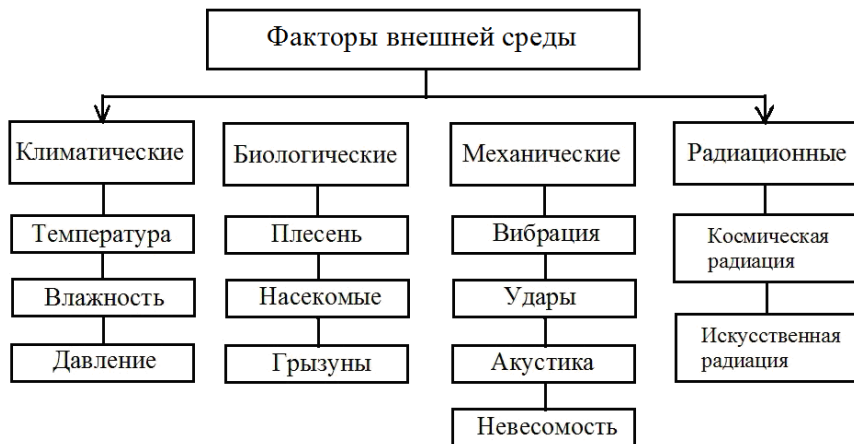


Рис. 1.6 – Классификация факторов внешней среды

При конструировании РЭС должна быть обеспечена стойкость к воздействию тех факторов внешней среды, которые характерны для условий эксплуатации, хранения и транспортирования объекта.

В зависимости от района предполагаемой эксплуатации РЭС в соответствии со стандартом ГОСТ 15150–69 «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнение для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды» различают девять основных климатических исполнений изделия:

1. Исполнение У (умеренная) – для районов с умеренным климатом, характеризующимся сравнительно устойчивой температурой, влажностью и давлением. Температура воздуха изменяется от -45 до $+40^{\circ}\text{C}$ при относительной влажности воздуха 70...80%. Европа, Западная и Южная Сибирь, большая часть территории США, Северная Япония, Южная Африка, Южная оконечность Южной Америки.

2. Исполнение УХЛ (холодная) – для районов с холодным климатом при среднегодовом минимуме температуры – 45°C (Восточная Сибирь, Аляска, Антарктида, Арктика).

3. Исполнение ТВ (тропическая влажная) – для районов с влажным тропическим климатом, при котором сочетание температуры, равной или выше $+20^{\circ}\text{C}$, и влажности, равной или выше 80%, наблюдается не менее 12 часов в сутки в течение двух и более месяцев в году (Индокитай, Индонезия, Филиппины, Куба).

4. Исполнение ТС (тропическая сухая) – для районов с сухим тропическим климатом со среднегодовой температурой, равной или выше $+40^{\circ}\text{C}$, которые не отнесены к районам с влажным тропическим климатом (Турция, Иран, Афганистан, большая территория Мексики).

5. Исполнение М – для районов с умеренно холодным морским климатом, включая моря, океаны и прибрежные территории, расположенные севернее между 30° северной широты и 30° южной широты.

6. Исполнение ТМ – для районов с тропическим морским климатом, включая моря, океаны и прибрежные территории, расположенные между 30° северной широты и 30° южной широты.

7. Исполнение О – общеклиматическое исполнение для суши (кроме Антарктиды).

8. Исполнение ОМ – общеклиматическое исполнение для судов с неограниченным сроком плавания.

9. Исполнение В – внеклиматическое исполнение для суши и моря (кроме Антарктиды).

Некоторые факторы могут проявлять себя независимо от остальных, другие – при совместном воздействии. Существует определённая связь между конкретным видом внешнего воздействия и ускоряемым с его помощью физико-химическим процессом в конструкции РЭС (табл. 1.2).

ГОСТ 15150–69 устанавливает категории размещения РЭС на объекте эксплуатации:

- на открытом воздухе;
- под навесом или в условиях, где колебания температуры и влажности несущественно отличаются от п.1;
- в закрытых помещениях без естественной вентиляции и кондиционирования;
- в помещениях с искусственным климатом, в том числе в отапливаемых помещениях;
- в помещениях с повышенной влажностью.

В качестве *нормальных климатических условий* принимают: температуру окружающего воздуха +15 ...+35⁰С, относительную влажность воздуха 45....75%, атмосферное давление 86...104 кПа (что соответствует 650...808 мм ртутного столба).

Таблица 1.2. Эффект от воздействия внешних факторов среды на РЭС

Внешние факторы	Эффект воздействия	Отказы РЭС
Высокая температура	Пересыхание защитных покрытий, изменение электрических характеристик, деформация сопрягаемых деталей, испарение жидких сред	Нарушение изоляции, увеличивающийся механический износ подвижных частей из-за расширения или потери смазки
Низкая температура	Конденсация влаги, изменение электрических характеристик (увеличение проводимости изоляторов), деформация сопрягаемых частей деталей	Нарушение изоляции, увеличивающийся износ подвижных частей, вызванный сжатием или потерей механической прочности
Высокая влажность	Снижение сопротивления изоляции между гальванически не связанными цепями, электролиз, коррозия	Физические разрушения, нарушения изоляции
Низкая влажность	Обезвоживание, хрупкость, потеря механической прочности, увеличение абразивного износа между подвижными частями деталей	Механические повреждения, растрескивание
Высокое давление	Сжатие, деформация	Механические повреждения (нарушение герметичности)
Низкое давление	Расширение, снижение электрической прочности воздуха, образование озона, ухудшение условий охлаждения	Механические повреждения (нарушение герметичности), искрообразование, перегрев
Плесень, насекомые, грызуны	Разложение и уничтожение элементов конструкции из органических материалов	Нарушение изоляции, пробой, короткое замыкание
Радияция	Ионизация материалов, нарушение структуры полупроводниковых переходов, снижение изоляционных свойств диэлектриков	Нарушение изоляции, пробой, короткое замыкание
Невесомость	Изменение свойств смазывающих масел, значений начальных напряжений в местах крепления блоков	Нарушение условий охлаждения, внезапные отказы элементов

Процесс разработки РЭС должен быть направлен на выбор таких ЭРЭ и материалов, схемотехнических и конструкторских решений, ко-

торые бы в совокупности обеспечили стойкость аппаратуры к внешним воздействующим факторам заданной интенсивности.

1.6. Элементная база РЭС

В состав элементов конструкции РЭС входят электрорадиоэлементы (ЭРЭ), установочные, конструктивные элементы, элементы монтажа и другие [30]. ЭРЭ применяются в основном в виде готовых, поставляемых предприятиями электронной промышленности радиодеталей и радиокомпонентов. Они составляют основу схмотехнической базы РЭС. В состав ЭРЭ входят микросхемы, микросборки, микроэлектронные узлы в корпусах и без них, устройства функциональной электроники, дискретные транзисторы, диоды, электровакуумные приборы, резисторы, постоянные и переменные конденсаторы, трансформаторы, переключатели, соединители, индикаторы.

Микросхема, интегральная схема (ИМС) – микроэлектронное изделие, выполняющее определённую функцию преобразования и обработки сигналов и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединённых элементов, компонентов и кристаллов. ИС с точки зрения требований к испытаниям, приёмке, поставке и эксплуатации рассматривается как единое целое.

Элемент ИМС – это часть ИМС, реализующая функцию какого-либо простого ЭРЭ (транзистора, диода, резистора, конденсатора). Элемент нельзя отделить от кристалла ИС (или её подложки) как самостоятельное изделие, следовательно, его нельзя испытать, установить и эксплуатировать.

Компонент ИМС – это часть ИМС, также реализующая функцию какого-то ЭРЭ, однако компонент перед сборкой ИМС был самостоятельным изделием в специальной упаковке (комплектующее изделие). Компонент в принципе может быть отделён от изготовленной ИМС для замены при ремонте (например, бескорпусной диод, транзистор, керамический конденсатор в гибридной плёночной МСБ).

Микросборка (по ГОСТ 17021 – 75) – микроэлектронное изделие, выполняющее определённую функцию и состоящую из элементов, компонентов и ИМС (корпусных и бескорпусных), а также других ЭРЭ, находящихся в различных сочетаниях. Это изделие разрабатывается и изготавливается конструкторами РЭС с целью миниатюризации. МСБ может иметь или не иметь собственный корпус. МСБ не сопровождается

ся ТУ. Её работоспособность обеспечивается защитой от внешних условий в составе разрабатываемого РЭС.

Устройства функциональной электроники (УФЭ) основаны на использовании физических принципов и явлений, реализация которых позволяет получить компоненты со сложным функциональным назначением в отличие от технологической интеграции, предусматривающей конструирование ИС на основе функционально простых элементов типа транзисторов, диодов, резисторов и т.д.

Установочные элементы – это держатели предохранителей, колпачки, клавиши и т.п.

Конструктивные элементы обеспечивают повышенную прочность, защиту от внешних воздействий, дестабилизирующих работу РЭС и механическое управление РЭС. Основу конструктивной базы составляют отдельные несущие конструкции и монтажные детали.

Несущие конструкции предназначены для механического закрепления, защиты от внешних воздействий и обеспечения доступности схемотехнических элементов при сборке и эксплуатации РЭС. К конструктивной базе относятся также: механические устройства управления в виде кнопочных и рычажных устройств и ручек, с помощью которых обеспечивается плавное и скачкообразное вращательное или поступательное движение рабочих органов регуляторов (резисторов, конденсаторов и т.п.). Деление элементов РЭС на схемотехнические и конструктивные часто условно. Например, основание МСБ (подложка) является не только конструктивно несущим элементом, но и местом создания плёночных элементов.

1.7. Материалы для элементов конструкций РЭС

Правильный выбор материала может быть сделан на основе анализа функционального назначения отдельных деталей и изделия в целом, условий эксплуатации и технологических процессов с учётом следующих факторов:

1. Материал является основой конструкции, т.е. определяет способность детали выполнять свои функции в условиях воздействия факторов внешней среды. Например, в качестве диэлектрика конденсатора постоянной ёмкости, работающего в контуре высокой частоты, применяют материал с малым значением тангенса угла диэлектрических потерь. В противном случае конденсатор вносит большое затухание и снижает добротность контура.

2. Материал определяет технологические характеристики детали, т.е. его обработка происходит в соответствии с определёнными технологическими процессами. Например, объёмные детали из стеклотекстолита можно обрабатывать только резанием. Детали из пластмасс можно изготовить прессованием, литьём под давлением, выдувным методом, что более выгодно при серийном и массовом производстве.

3. От свойств материала зависит точность изготовления детали. Например, точность изготовления изделий при гибке зависит от упругих свойств материала. Деталь из мягкой стали при прочих равных условиях будет изготовлена с большей точностью, чем деталь из пружинящей стали.

4. Материал влияет на габариты и массу изделий. Например, использование алюминиевых сплавов вместо стали может дать уменьшение массы в 1,5 – 3 раза при полном удовлетворении требований к прочности и жёсткости конструкции.

5. Материал определяет эксплуатационные характеристики изделия, его надёжность. Например, контакты, покрытые слоем драгоценного металла, выдерживают значительно большее число переключений, чем контакты из латуни.

При изготовлении элементов конструкции РЭС широко используются пластмассы. По сравнению с металлами они обладают следующими достоинствами: меньшая масса, химическая стойкость и влагостойкость, лучшая вибропоглощающая способность, прозрачность или полупрозрачность, лёгкость обработки, меньшая стоимость, хорошие диэлектрические свойства. Пластмассы имеют также и ряд недостатков: меньшая прочность, больший коэффициент линейного расширения, меньшая теплостойкость, способность к поглощению влаги, воспламеняемость, подверженность влиянию ультрафиолетового излучения.

Для изготовления несущих элементов конструкций РЭС используются тонколистовые стали, алюминиевые, магниевые и титановые сплавы. Обычно используют прокат толщиной до 2 мм в виде листов, лент, гнутых профилей из углеродистой стали 10кп, алюминиевых сплавов АМц, Д16, В-95, АЛ2. Используются магниевые сплавы МА2-1, МА-8, титановые сплавы ОТ4 и ВТ1-0. Углеродистая высокопластичная сталь 10кп хорошо сваривается и деформируется в холодном состоянии. Применяется, когда необходимы значительные пластические деформации.

Наиболее высокопластичный из алюминиевых сплавов – алюминево-марганцевый сплав АМц, обладающий повышенной коррозионной стойкостью. Как и другие алюминиевые сплавы, он примерно в три раза легче стали. Алюминиевый сплав Д16 более прочный и жёсткий,

чем сплав АМц. Магниеые сплавы в 1,5 раза легче алюминиевых, их используют в том случае, когда существуют жёсткие требования к массе конструкции. По некоторым другим параметрам, в частности по коррозионной стойкости и стоимости, они уступают алюминиевым сплавам. Титановые сплавы, обладающие высокой прочностью и твёрдостью, сравнимой с твёрдостью стали, коррозионно-стойки и почти в два раза легче стали. Однако они являются труднообрабатываемыми и их стоимость в несколько раз выше стоимости сталей. Применяются обычно в специальных условиях, например, в космосе. Для изготовления магнитопроводов, трансформаторов, дросселей используют магнитные материалы – электротехническую сталь Э310, Э320, Э330, пермаллой (сплав железа и никеля), карбонильное железо, альсифер, ферриты. Для изготовления контактных групп переключателей используют такие медные сплавы, как латунь Л-63 (медно-цинковый сплав) и бронза Бр.52 (сплав меди и олова). Для изготовления намоточных и монтажных проводов используется медь марки М1.

Из диэлектрических материалов наиболее часто используются гетинакс, текстолит, стеклотекстолит, фторопласт, эбонит, полистирол, керамика, стекло, ситалл и другие. Для изготовления печатных плат используется гетинакс фольгированный листовой марки ГФ-1-35-2,0 (ГОСТ 1036-78) с толщиной листа 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 мм и стеклотекстолит фольгированный марок СФ-1 и СФ-2 с толщиной листа 0,8; 1,0; 1,5; 2,0 мм.

2. СОЕДИНЕНИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ РЭС

2.1. Компоновка элементов РЭС

Компоновка представляет собой размещение элементов РЭС в пространстве или на плоскости. Задача компоновки – выбор форм, основных геометрических размеров, ориентировочное определение массы и расположения в пространстве составных элементов изделия. Имея компоновочный эскиз изделия и схему электрическую принципиальную, можно ещё до разработки рабочих чертежей и изготовления макета оценить возможный характер и уровень паразитных связей, оценить надёжность изделия, тепловые режимы его работы.

Компоновочные решения должны удовлетворять следующим требованиям:

- отсутствие между отдельными элементами и блоками изделия существенных паразитных магнитных и электрических связей, влияющих на технические характеристики изделия;
- минимизация влияния тепловых и механических воздействий на изменение технических характеристик изделия;
- обеспечение технологичности сборки и монтажа в автоматическом и полуавтоматическом режиме [23];
- лёгкий доступ к деталям для контроля, ремонта и технического обслуживания;
- расположение и конструкция органов настройки и управления, обеспечивающие максимальные удобства операторам;
- минимальные массогабаритные показатели;
- изделия должны удовлетворять требованиям технической эстетики и эргономики.

Перечисленные требования могут находиться в противоречии друг с другом. В этом случае выбор происходит с учётом назначения изделия, области его применения и запросов заказчика. Процесс компоновки, как и всякий процесс конструирования, сводится к нахождению оптимального решения. Для компоновки широко используются системы автоматизированного проектирования, например, программа *3D Studio MAX*. Результатами такого проектирования является комплект конст-

рукторской документации, исполняемые файлы для управляющего оборудования, графическое изображение устройства.

Основными конструкторскими параметрами, с которыми приходится сталкиваться при выполнении компоновки, являются: масса детали или изделия, габариты детали или изделия, полезное использование массы, полезное использование объёма, полезное использование площади.

Полезное использование объёма описывают с помощью коэффициента заполнения по объёму K_v , который определяется как

$$K_v = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{V},$$

где v_i – объём i -го элемента устройства; n – количество элементов в устройстве; V – общий объём устройства, определяемый объёмом корпуса.

Различают физический и установочный объёмы устройства. Установочный объём – это такой объём, который необходим для установки и монтажа элемента в устройстве. Понятно, что установочный объём больше или равен физическому объёму. Расчёт коэффициента заполнения, выполненный по установочному объёму, является более точным [15].

Типовые значения коэффициентов заполнения по объёму для некоторых видов профессиональных РЭС приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Коэффициенты заполнения профессиональных РЭС по объёму

Функциональное назначение РЭС	Категория РЭС		
	стационарная	переносная	бортовая
Радиопередатчик	0,2	0,4	0,6...0,7
Радиоприёмник	0,4	0,5	0,7...0,8
Цифровое РЭС	0,7	0,7	0,8...0,9
Источник питания	0,5	0,6...0,7	0,7...0,8

Анализ таблицы позволяет сделать два вывода:

1. Коэффициент заполнения выше по мере возрастания эксплуатационных требований к РЭС.

2. Коэффициент заполнения при одинаковых эксплуатационных условиях выше в случае применения цифровых РЭС.

Аналогично определяются коэффициент заполнения по массе K_m , а для печатных плат – коэффициент заполнения по площади K_s . Эти коэффициенты определяются по формулам:

$$K_m = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{M}, \quad K_s = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S},$$

где m_i – масса элемента; S_i – установочная площадь элемента; M – масса всего изделия; S – площадь всего изделия; n – количество элементов в изделии.

Значения коэффициентов заполнения являются одним из критериев уровня разработки. Чем ближе коэффициент заполнения к единице, тем выше уровень разработки. Однако при больших коэффициентах заполнения могут возникнуть трудности с обеспечением теплового режима и электромагнитной совместимости из-за высокой плотности установки элементов.

2.2. Виды соединений и методы монтажа

Компоновка РЭС осуществляется пространственным размещением компонентов по уровням конструкторской иерархии. Отдельные компоненты РЭС (ЭРЭ, ИМС и др.) должны электрически соединяться между собой [23].

Соединения элементов в конструкциях РЭС бывают разъёмные и неразъёмные, механические и электрические. Разъёмные и неразъёмные виды соединений используются при сборке конструкций РЭС и их элементов.

Наиболее распространённым видом разъёмного соединения является резьбовое. С помощью резьбового соединения крепятся панели, каркасы, направляющие, переключатели, переменные резисторы, трансформаторы, ручки, электроизмерительные приборы и др. При этом применяются такие крепёжные элементы как винты, болты, шпильки, гайки и шайбы.

Неразъёмные механические соединения выполняются пайкой, сваркой, развальцовкой, заклёпками, склеиванием, обжимкой и опрес-

совкой. При пайке зазор между соединяемыми элементами заполняется расплавленным припоем без плавления основного материала элементов. Используемые припои – ПОС61, ПОС 90 и другие. В качестве флюса используется канифоль и другие специальные растворы.

При производстве РЭС выполняются такие виды сварки, как точечная, роликовая, ультразвуковая. При сварке происходит плавление соединяемых материалов конструкции, поэтому выбранный вид сварки должен обеспечить её минимальную деформацию в процессе и после сварки, что зависит от жёсткости конструкции, режима сварки и толщины соединяемых элементов.

Клеевые соединения являются достаточно технологичными и применяются в том случае, когда не требуется такая прочность соединений, как при сварке. Их применение снижает стоимость изделий. К числу преимуществ клеевых соединений можно отнести: возможность соединения разнородных материалов, возможность получения качественного соединения тонких элементов конструкций, герметичность соединения. К недостаткам клеевых соединений можно отнести следующие: низкая теплостойкость, меньшая долговечность из-за старения клея, сложный контроль качества соединений, сильная зависимость прочности клеевого соединения от качества подготовки склеиваемых поверхностей.

Заклёпочные соединения используют для деталей из несвариваемых, а также не допускающих нагрева материалов. Материал для заклёпок – пластичные металлы и сплавы, алюминиевые сплавы, латуни и др. В последнее время эти соединения вытесняются более экономичными – сварными и клеевыми.

Электрические соединения – часть конструкции, предназначенная для обеспечения электрически неразрывных связей элементов и составных частей РЭС между собой в соответствии с принципиальной или монтажной схемой. Технологический процесс выполнения электрических соединений называется электромонтажом или просто монтажом. Классификация методов монтажа представлена на рис. 2.1.

Качество выполнения электрических соединений в значительной степени определяет качество и технологичность всей конструкции РЭС. Электрические соединения могут вносить искажения, затухания и задержку непрерывного или дискретного сигнала при распространении в электрической линии связи, а возникающие в ней паразитные связи и помехи могут нарушить нормальное функционирование РЭС. Трудоёмкость сборочных и монтажных работ при производстве РЭС составляет 40...60% всей трудоёмкости изготовления изделия.



Рис. 2.1 – Методы монтажа

Надёжность РЭС при эксплуатации в значительной мере определяется числом контактов, входящих в электрические соединения. Вероятность отказа каждого элемента примерно равна вероятности отказа одного из его контактов. Таким образом, чем меньше контактов и контактных групп, тем выше надёжность изделия.

2.3. Печатные платы

Печатная плата (ПП) – основа монтажа любого РЭС, при котором ИМС, ЭРЭ и другие элементы устанавливаются на изоляционное основание с системой токопроводящих полосок металла (проводников), которыми они электрически соединяются между собой в соответствии с электрической принципиальной схемой [7, 12].

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

Печатный проводник – проводящая полоска в проводящем рисунке печатной платы.

Стандартом предусмотрены следующие типы печатных плат: односторонняя печатная плата, проводящий рисунок в которой выполнен только на одной стороне; двусторонняя печатная плата, проводящие рисунки и все требуемые соединения в которой выполнены на двух сторонах; многослойная печатная плата, состоящая из чередующихся слоёв изоляционного материала с проводящими рисунками на двух или более

слоях, между которыми выполнены требуемые соединения; гибкая печатная плата, имеющая гибкое основание; гибкий печатный кабель, представляющий собой систему печатных проводников, размещённых на гибком основании.

В наибольшей степени получили распространение односторонние и двухсторонние ПП. На рис. 2.2 приведены основные измеряемые параметры ПП согласно ГОСТ 23751–86.

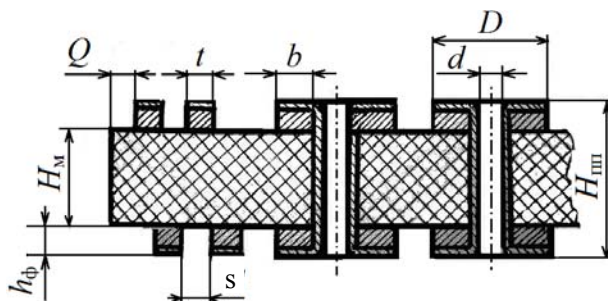


Рис. 2.2 – Основные измеряемые параметры печатных плат

На рис. 2.2 введены обозначения: H_m – толщина материала основания ПП; $H_{пп}$ – толщина печатной платы; t – толщина печатного проводника; s – расстояние между печатными проводниками; D – диаметр контактной площадки; d – диаметр отверстия; b – расстояние от края отверстия до края контактной площадки (гарантийный пояс); Q – расстояние от края печатной платы, выреза, паза до элементов проводящего рисунка; $h_{ф}$ – толщина фольги.

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

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

На печатной плате могут располагаться монтажные и крепёжные отверстия. Монтажные отверстия предназначены для установки ИМС, ЭРЭ и других элементов на ПП. Крепёжные отверстия служат для механического крепления ПП на шасси корпуса РЭС и крепления разъёмов [26].

По точности выполнения печатных элементов конструкции ПП делят на пять классов (табл. 2.2).

Таблица 2.2. Классы точности печатных плат

Элемент печатного монтажа	Классы точности печатных плат				
	1	2	3	4	5
Ширина печатного проводника	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
Расстояние между печатными проводниками	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
Расстояние от края ПП до элементов проводящего рисунка (гарантийный пояс)	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025
Отношение диаметра отверстия к толщине основания ПП	0,40	0,40	0,33	0,25	0,20

Первый и второй классы применяются при малой насыщенности поверхности ПП дискретными элементами и ИМС малой степени интеграции. Третий класс используется для ИМС со штыревыми и планарными выводами при средней и высокой насыщенности поверхности ПП элементами. Четвёртый класс – при высокой насыщенности поверхности ПП элементами с выводами и без них. Пятый класс – при очень высокой насыщенности поверхности ПП элементами с выводами и без них.

Ширину печатных проводников рассчитывают и выбирают исходя из допустимой токовой нагрузки, свойств токопроводящего материала, температуры окружающей среды. Расстояние между проводниками зависит от допустимого рабочего напряжения, свойств диэлектрика, условий эксплуатации и связано с помехоустойчивостью, искажением сигналов и короткими замыканиями. Координатная сетка ПП необходима для координации элементов печатного рисунка (рис. 2.3). В узлах пересечения координатной сетки располагаются монтажные и переходные отверстия. Основным шагом координатной сетки принят размер 0,5 мм в обоих направлениях.

Если этот шаг не удовлетворяет требованиям конструкции, можно применить шаг, равный 0,05. При использовании ИМС и других элементов с шагом выводов 0,625 допускается применение шага координатной сетки 0,625 мм. В случае необходимости применить другой шаг, предпочтительнее выбирать размеры, кратные основному шагу.

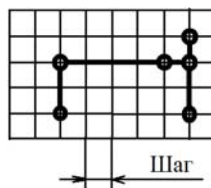


Рис. 2.3 – Координатная сетка чертежа печатной платы

При использовании микросхем зарубежного производства с расстоянием между выводами, кратным дюйму, допускается использование шага координатной сетки, кратного величине 2,54 мм.

Размеры ПП, если они специально не оговорены в ТЗ, определяются с учетом количества устанавливаемых элементов, их установочных площадей, шага установки, зон установки разъёма. Линейные размеры ПП рекомендуется выбирать по ГОСТ 10317 – 79 (табл. 2.3). Соотношение линейных размеров сторон должно составлять не менее 3 : 1.

Таблица 2.3. **Линейные размеры печатных плат**

Ширина, мм	Длина, мм
20	30; 40
30	40
40	60
45	75; 80
50	60; 80; 100; 150
60	60; 80; 90; 100; 140; 160
75	75; 90; 170
80	130; 140
90	90; 120; 150; 170
100	120; 130
120	120; 140; 150; 160; 170; 180; 200
130	200
140	150; 200
150	150; 170; 180; 200
160	170; 200
170	180; 200; 280
200	360

Диаметры монтажных и переходных отверстий должны соответствовать ГОСТ 10317 – 79 и выбираться из ряда 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,1; 2,2; 2,3; 2,4; 2,5; 2,6; 2,7; 2,8; 2,9; 3,0 мм. Монтажные отверстия предназначены для установки ИМС и ЭРЭ, а переходные отверстия – для электрической связи между слоями или сторонами ПП.

Допустимая плотность тока для односторонних ПП, двусторонних ПП и наружных слоёв многослойных ПП – 20 А/мм², для внутренних слоёв многослойных ПП – 15 А/мм². Допустимое рабочее напряжение между элементами проводящего рисунка, расположенными в соседних слоях ПП, зависит от материала основания и не должно превышать значений, приведённых в табл. 2.4.

Таблица 2.4. Допустимые рабочие напряжения для материалов ПП

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

В качестве материалов для оснований печатных плат используют керамику; фольгированные и нефольгированные диэлектрики (гетинакс, текстолит, стеклотекстолит, стеклоткань, лавсан, фторопласт), металлические пластины. При выборе материала оснований ПП обращают внимание на следующие обстоятельства: предполагаемые механические воздействия (вибрации, удары), класс точности ПП, условия эксплуатации, стоимость.

Выбор материала основания рекомендуется осуществлять в соответствии с ОСТ 4.010.022–85. Некоторые наиболее распространённые виды материалов приведены в табл. 2.5. Диэлектрическое основание платы представляет собой обычно бумажную (гетинаксы) или текстиль-

ную (текстолиты) основу, пропитанную фенольной или эпоксидной смолой. Преимущество гетинаксов в том, что они легко поддаются механической обработке, что важно при серийном и массовом выпуске РЭС. Их недостаток – повышенная чувствительность к влажности и нестабильность размеров.

В стеклотекстолитах в качестве основы используют стеклоткань, пропитанную эпоксидной смолой. Этот материал более качественный, чем гетинакс, но более дорогой и труднообрабатываемый.

Таблица 2.5. Материалы оснований печатных плат

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

Платы на металлическом основании с нанесённым на него изоляционным покрытием применяются, когда нужно обеспечить отвод тепла при размещении на плате тепловыделяющих ЭРЭ, полупроводниковых приборов и ИМС большой мощности. Их достоинством также является большая механическая прочность. При повышенных требованиях к стабильности параметров используют керамические платы. На поверхности таких плат наносят проводящие и резистивные пасты и вжигают их при температуре 600...700 °С. Печатный монтаж может быть реализован различными способами с применением различных материалов (рис. 2.4).

Из субтрактивных методов наибольшее применение нашли химический и комбинированный позитивный. Первый используется для получения односторонних печатных плат, внутренних слоев многослой-

ных печатных плат и гибких печатных шлейфов. Его достоинство – высокая точность геометрии проводников из-за отсутствия процессов гальванического осаждения меди. Вторым методом получают двусторонние и многослойные ПП из фольгированного диэлектрика. На рис. 2.5 представлена последовательность основных технологических операций изготовления ПП химическим негативным методом.



Рис. 2.4 – Способы получения проводников

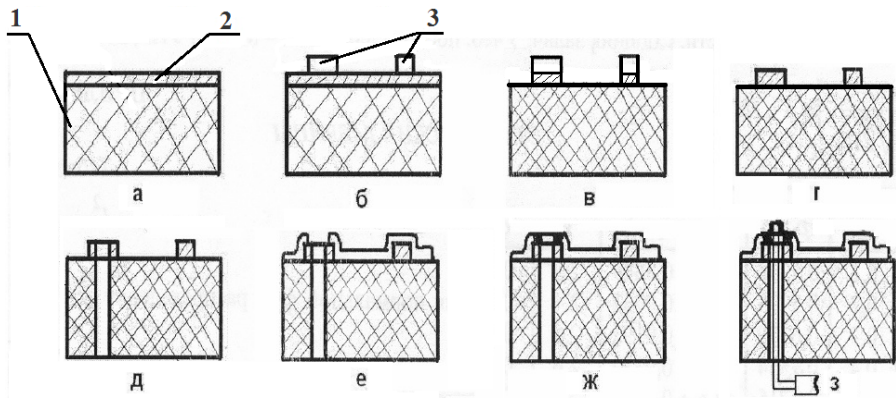


Рис. 2.5 – Изготовление печатных плат химическим негативным методом

На рис. 2.5 введены обозначения: 1 – диэлектрическое основание печатной платы; 2 – медная фольга, 3 – фоторезист. Стадии технологического процесса, в соответствии с буквенными обозначениями на рисунке, представлены в табл. 2.6.

Таблица 2.6. Стадии технологического процесса изготовления ПП

Стадия ТП	Описание
а	Заготовка из фольгированного диэлектрика
б	Нанесение фоторезистивного печатного рисунка
в	Травление печатного рисунка
г	Удаление фоторезиста
д	Механическая обработка монтажных отверстий
е	Нанесение лаковой (эпоксидной) маски
ж	Обработка контактных площадок
з	Пайка выводов ИМС, ЭРЭ и других элементов

Технология формирования печатного рисунка выполняется с использованием процесса литографии и веществ, обладающих специальными свойствами – фоторезистов. Такие вещества устойчивы к воздействию кислот и щелочей, что даёт возможность защитить отдельные участки печатной платы, на которые наносились фоторезисты. Они также изменяют свои свойства под воздействием ультрафиолетового излучения.

Проектирование печатных плат осуществляется ручным и автоматизированным методами. Последний является более перспективным в условиях современного производства ПП и выполняется с использованием большого набора программных средств. После выполнения трассировки платы обычно возникает задача конверсии из электронной версии в конструкторскую, выполненную с соблюдением правил ЕСКД. При размещении элементов на поверхности ПП необходимо учитывать следующие условия: размещение массивных элементов влияет на работу платы в условиях механических воздействий; параметры элементов могут меняться при воздействии температуры; взаимное размещение элементов может приводить к образованию паразитных связей между ними.

Конструирование печатных плат обычно выполняется в следующей последовательности: изучение ТЗ на изделие, в состав которого входит ПП; определение условий эксплуатации и группы жёсткости; выбор типа ПП и класса точности; выбор размеров и конфигурации; выбор материала основания; выбор конструктивного покрытия; размещение навесных элементов и трассировка печатных проводников; выбор метода маркировки и её расположения; разработка конструкторской документации.

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

Конструктивные покрытия необходимы для обеспечения стабильности электрических, механических и других параметров ПП. Основные используемые покрытия приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7. Основные используемые покрытия для ПП

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

Неметаллические конструктивные покрытия используются для защиты печатных проводников и поверхности основания печатной платы от воздействия припоя, элементов проводящего рисунка, замыкания навесными элементами, влаги при эксплуатации. Используются такие диэлектрические покрытия как эпоксидные смолы, эмали, оксидные плёнки.

Количество типоразмеров отверстий печатной платы следует по возможности ограничивать. Рекомендуются применять не больше трёх типоразмеров монтажных и переходных отверстий. Центры отверстий

располагают в узлах координатной сетки. Основным шагом координатной сетки принят размер 0,5. Центры монтажных отверстий под неформуемые выводы многоконтактных элементов, межцентровые расстояния которых не кратны шагу координатной сетки, следует располагать так, чтобы в узле координатной сетки находился центр по крайней мере одного из монтажных отверстий, а центры отверстий под остальные выводы располагались в соответствии с требованием конструкций устанавливаемых элементов с указанием необходимых размеров (рис. 2.6).

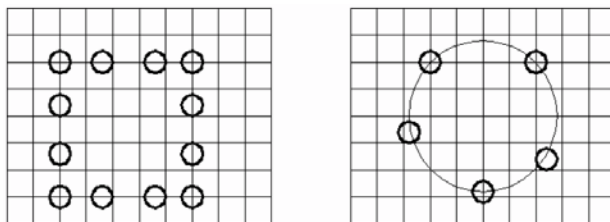


Рис. 2.6 – Расположение отверстий на координатной сетке ПП

Неметаллизированные монтажные отверстия следует располагать в зоне контактной площадки или, в необходимых случаях, рядом с ней. Диаметр монтажного отверстия выбирают в пределах 0,3...0,4 мм и его конкретное значение зависит от диаметра вывода навесного элемента.

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

3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЭС

3.1. Основные понятия и определения

Чтобы быть востребованным потребителем, конструкция РЭС должна быть изготовлена в процессе производства. Назначение, область применения и особенности конструкции РЭС влияют на структуру производственного и технологического процесса. Достаточно большие различия, например, имеют технологические процессы изготовления устройств СВЧ, низкочастотной аппаратуры, оптических и оптоэлектронных приборов, высоковольтного оборудования, авиационного и космического бортового оборудования [16].

Конструкция РЭС будет максимально конкурентоспособной, если она учитывает и использует особенности уже существующего налаженного производства, другими словами, обладает технологичностью. Под технологичностью понимают приспособленность к ограниченному расходованию материальных, энергетических, временных и человеческих ресурсов. Чем больше в конструкцию вовлечено уже освоенных, стандартных или заимствованных деталей, тем меньше времени займёт перепрофилирование производства и тем выше его технологичность.

Технология (происходит от древнегреческих слов τέχνη – искусство, мастерство и λόγος – мысль) в широком смысле – это совокупность методов, процессов и материалов, используемых в какой-либо отрасли деятельности, а также научное описание способов технического производства. В более узком практическом аспекте технология – это комплекс организационных мер, операций и приёмов, направленных на изготовление, обслуживание, ремонт и/или эксплуатацию изделия с номинальным качеством и оптимальными затратами и обусловленных текущим уровнем развития науки, техники и общества в целом.

В отличие от конструкции устройства, отвечающей на вопрос «что?», технология отвечает на вопрос «как?». Другими словами, технология раскрывает содержание и последовательность применяемых методов и инструментальных средств для изготовления изделия по имеющейся конструкторской документации.

Можно сказать, что технология – это искусство воплощения оригинальных идей стандартными приёмами.

3.2. Виды производственных процессов

Как отмечалось выше, ТП является составной частью производственного процесса. Производственные процессы также классифицируются по ряду признаков.

По типу различают единичное, серийное (в том числе мелкосерийное, среднесерийное, крупносерийное) и массовое производство. Сравнительная характеристика данных видов производства представлена в табл. 3.1.

Таблица 3.1. **Сравнительная характеристика типов производства**

Параметры	Тип производства		
	Единичное	Серийное	Массовое
Программа выпуска	Небольшая	Средняя	Большая
Оборудование	Универсальное	Специализированное	Автоматизированное, робототехнические комплексы
Квалификация персонала	Высокая	Средняя	Средняя и низкая
Себестоимость	Высокая	Средняя	Низкая
Производительность	Низкая	Средняя	Высокая

По способам организации различают поточное и групповое производство.

Поточное производство – способ организации производства, при котором обеспечивается согласованное выполнение операций ТП во времени.

Признаки поточного производства:

- расположение рабочих мест в соответствии с ТП;
- ритмичное выполнение производственных операций;
- синхронность и параллельность выполнения операций;
- спецификация рабочих мест по операциям.

Групповое производство – производство, при котором происходит изготовление или ремонт группы изделий с разными конструктивными, но общими технологическими признаками.

По уровню применяемых средств различают ручное, автоматизированное и автоматическое производство.

По виду технологического процесса можно выделить большое разнообразие производственных процессов. Можно отметить следующие:

- литейное производство;
- прессовое производство;
- токарное производство;
- производство методом холодной штамповки;
- производство на основе лазерных и биотехнологий;
- производство изделий из пластмасс и другие.

3.3. Структура и классификация технологических процессов

Структура ТП представлена на рис. 3.1. Необходимо заметить, что в конкретном ТП некоторые элементы общей структуры могут отсутствовать, например, вспомогательный ход инструмента.

Поясним значение элементов ТП, представленных на рис. 3.1.

Операция – законченная часть ТП, выполненная на одном рабочем месте, над одной деталью или над группой совместно обрабатываемых и/или собираемых деталей.

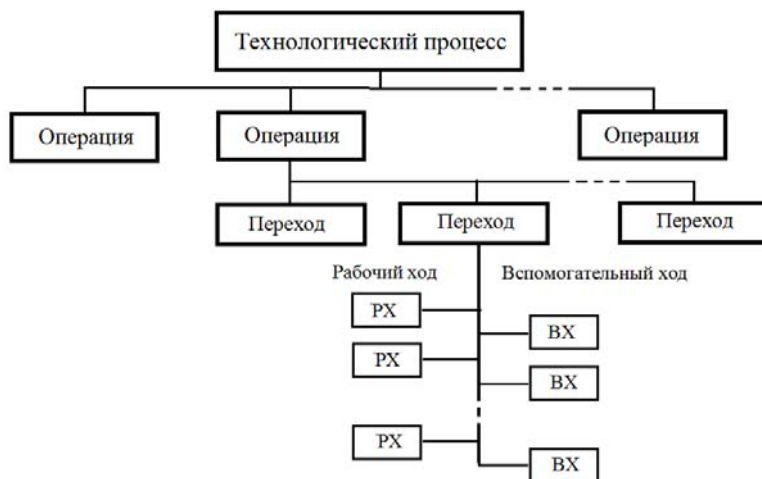


Рис. 3.1 – Структура технологического процесса

Переход – законченная часть технологической операции, характеризующаяся постоянством применяемого инструмента для обработки поверхностей или постоянством соединяемых деталей при сборке.

Рабочий ход – законченная часть перехода, состоящая из однократного или многократного применения инструмента. При этом происходит изменение качества, формы поверхности или детали.

Вспомогательный ход – законченная часть перехода, состоящая из однократного или многократного применения инструмента без изменений размеров, формы, качества.

Технологические процессы классифицируются по ряду признаков. В зависимости от степени разработки различают проектный и рабочий ТП. Проектный ТП характеризуется начальной стадией разработки, наличием множества вариантов. На основе анализа проектных ТП выбирают основной или рабочий ТП. В зависимости от типа производства и объёма выпуска различают единичный, типовой и групповой ТП. Единичный ТП разрабатывается, как правило, только на данное изделие. Используется в крупносерийном и массовом производстве.

Типовой ТП разрабатывается для конструктивно подобных изделий (например, на печатные платы). Групповой ТП разрабатывается на технологически подобные изделия (например, на изделия из пластмасс, полученные методом выдувного формования – бочки, банки, бутылки). Типовой и групповой ТП применяются, как правило, в мелкосерийном и серийном производстве.

В зависимости от наличия парка оборудования различают временный, стандартный и перспективный ТП. Временный (оперативный) ТП разрабатывается с учётом имеющегося на предприятии оборудования при изготовлении пробной партии изделий. Стандартный ТП является обязательным к применению для предприятия, отрасли, государства в целом. Перспективный ТП разрабатывается для вновь создающегося производства или при модернизации предприятия.

По степени детализации технологические процессы подразделяют на маршрутные, операционные и маршрутно-операционные. Маршрутный ТП определяет порядок (маршрут) следования операций, их вид и наименование, оборудование и оснастку для выполнения операций, трудоёмкость выполнения операций и квалификацию работников. Применяется в мелкосерийном производстве. Все параметры маршрутного ТП заносятся в маршрутные карты.

Операционный ТП предполагает подробную разработку каждой операции. Окончательно выбираются оборудование и оснастка, выбираются или рассчитываются технологические режимы. Все параметры

операционного ТП заносятся в операционные карты. Маршрутно-операционный ТП применяется, когда на отдельные, наиболее сложные операции маршрутного процесса разрабатываются операционные карты, т.е. является комбинацией двух предыдущих видов, а также наиболее часто применяемым видом ТП в рамках данного классификационного признака.

3.4. Разработка технологического процесса

Исходными данными для разработки ТП являются следующие:

- конструкторская документация (сборочный монтаж, сборочный чертёж, сборочный чертеж платы, чертёж платы, электромонтажный чертёж, чертёж общего вида, спецификация);
- принципиальная схема устройства, перечень элементов;
- назначение и принцип работы устройства;
- наличие технологического оборудования, оснастки;
- условия эксплуатации, в том числе необходимость защиты, необходимость испытаний;
- информационная база, справочная документация, объекты интеллектуальной собственности;
- программа и сроки выпуска изделия;
- ориентировочная стоимость изделия.

Можно выделить следующие этапы разработки ТП применительно к радиоэлектронным устройствам.

1. Анализ исходных данных – изучение конструкторских документов (КД), анализ и расчёт технологичности конструкции.

2. Выбор типового ТП – формирование технологического хода изделия по особой классификации.

3. Разработка схемы сборки – анализ состава детали сборочной единицы изделия – выбор базовой детали сборочной единицы – анализ способа сборки монтажа – сборка.

4. Составление маршрутного ТП – определение последовательности технической операции, выбор оборудования и средств технического оснащения.

5. Разработка технологических операций – структура операций и последовательность переходов, окончательный выбор оборудования и оснащения, расчёт загрузки оборудования.

6. Расчёт технико-экономической эффективности – определение разряда работ, штучного времени, производительности труда и т.д.

7. Анализ технического процесса с точки зрения безопасности – анализ требований по уровню шума, уровню вибрации, воздействию вредных веществ, экологическая безопасность.

8. Оформление технологической документации – операционные карты, маршруты ТП и др.

9. Разработка ТЗ на специальную оснастку – схемы крепления заготовок, схемы привязки приспособлений к стандартному оборудованию.

В табл. 3.2 в качестве примера представлен типовой ТП сборки модуля РЭС второго уровня.

**Таблица 3.2. Типовой ТП сборки электронного модуля (блока)
2-го уровня**

Номер операции	Наименование операции	Применяемое оборудование
1	Установка и пайка проводов-перемычки	Монтажный стол
2	Сушка и поляризация клея	Шкаф- сушка
3	Установка, приклейка, диагностическая подпайка выводов интегральных микросхем	Устройство программной сборки
4	Установка и приклейка конденсаторов	500- 600 элемент/ч
5	Сушка и поляризация клея	Шкаф- сушка
6	Пайка выводов ИМС	ПНП- 5, 800...1000 эл./час
7	Пайка выводов конденсаторов	Квант- 500 250...400 ш/ч
8	Визуальный контроль соединения	Монтажный стол
9	Промывка модулей	150 плат/ч
10	Диагностический контроль и разборка	Аппаратура контроля
11	Лакирование модулей	Установка 50...100
12	Сушка модулей	Установка 50...60 модулей

3.5. Технологичность конструкции РЭС

Существуют понятия производственной и эксплуатационной *технологичности*. Производственная технологичность конструкции проявляется в сокращении затрат средств и времени на конструкторско-технологическую подготовку персонала и процессы изготовления, включая контроль и испытания. Эксплуатационная технологичность проявляется в сокращении затрат средств и времени на техническое обслуживание и ремонт изделия.

Технологичность изделия можно оценить количественно, используя систему показателей. Базовые (нормативные показатели) представляют собой исходные значения, относительно которых даётся сравнительная оценка технологичности данной конструкции. Уровень технологичности определяет соотношение конкретного показателя с базовым.

Базовые показатели технологичности для электронных схем блоков, определяемые на стадии разработки рабочей документации, и их коэффициенты значимости приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Показатели технологичности конструкции РЭС

Показатель технологичности	Весовой коэффициент, φ_i	Расчёт показателя
Коэффициент использования микросхем и микросборок	1,0	$K_{имс} = \frac{N_{имс}}{N_{эрэ}}$
Коэффициент автоматизации и механизации монтажа	1,0	$K_{а.м.} = \frac{N_{а.м.}}{N_{м.}}$
Коэффициент автоматизации и механизации подготовки ЭРЭ к монтажу	0,75	$K_{а.м.эрэ} = \frac{N_{а.м.эрэ}}{N_{эрэ}}$
Коэффициент автоматизации и механизации операций контроля и настройки	0,5	$K_{а.к.н.} = \frac{N_{а.к.н.}}{N_{к.н.}}$
Коэффициент повторяемости ЭРЭ	0,3	$K_{п.эрэ} = 1 - \frac{N_{т.эрэ}}{N_{эрэ}}$
Коэффициент применяемости ЭРЭ	0,2	$K_{пр.эрэ} = 1 - \frac{N_{от.эрэ}}{N_{т.эрэ}}$
Коэффициент прогрессивности формообразования	0,1	$K_{\phi} = \frac{D_{пр}}{D}$

В табл. 3.3 приняты обозначения: $N_{имс}$ – количество интегральных микросхем в изделии; $N_{эpz}$ – количество электрорадиоэлементов в изделии; $N_{a.м.}$ – количество автоматизированных и механизированных монтажных соединений; $N_{м.}$ – общее количество монтажных соединений; $N_{a.м.эpz}$ – количество ЭРЭ, подготовленных к монтажу автоматизированным и механизированным способом; $N_{a.к.н.}$ – количество ЭРЭ, контролируемых и настраиваемых автоматизированным способом; $N_{т.эpz}$ – количество типоразмеров ЭРЭ; $N_{от.эpz}$ – количество оригинальных типоразмеров ЭРЭ; D_{np} – количество деталей, изготовленных прогрессивными методами формообразования (штамповкой, прессованием, литьём под давлением и пр.); D – общее количество деталей в изделии.

Основным показателем, используемым для оценки технологичности конструкции, является комплексный показатель технологичности:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^7 K_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^7 \varphi_i},$$

где K_i – значение частного показателя, определяемого из таблицы;

φ_i – весовой коэффициент показателя.

Уровень технологичности конструкции изделия при известном нормативном показателе оценивается отношением полученного комплексного показателя качества к нормативному показателю K_n . При этом должно выполняться условие:

$$\frac{K}{K_n} \geq 1.$$

Нормативное значение показателя K_n технологичности конструкции блоков РЭС в условиях серийного производства составляет 0,5...0,8, а для опытного производства 0,4...0,7. Эти значения во многом условны, так как зависят от функционального назначения РЭС, технологии производства, условий эксплуатации и других факторов. Допустимый для отрасли (предприятия) уровень технологичности конструкции устанавливается соответствующими стандартами.

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РЭС

В конструкции РЭС используется большое количество деталей, выполняющих различные функции: детали несущей конструкции, корпусные детали, детали, обеспечивающие эргономические и эстетические характеристики, детали электромеханических узлов и другие [28]. Такое разнообразие требует применения различных технологических процессов изготовления деталей, трудоёмкость которых показана на рис. 4.1.



Рис. 4.1 – Трудоёмкость основных технологических процессов изготовления деталей РЭС

Как следует из диаграммы, представленной на рисунке, наибольшую трудоёмкость имеют операции сборки и монтажа радиоэлектронных изделий. Рассмотрим некоторые примеры технологических процессов, используемых при производстве РЭС [3, 16].

4.1. Обработка деталей точением

Обработка деталей точением производится на станках токарной группы. Данным методом изготавливаются такие широко применяемые в РЭС детали как ось, втулка, шкив.

Ось – деталь, предназначенная для соединения других деталей между собой, воспринимающая только поперечные нагрузки и не передающая полезного крутящего момента.

Втулка – деталь цилиндрической или конической формы, имеющая осевое отверстие, в которое входит сопрягаемая деталь.

Шкив – фрикционное колесо с ободом или наплавкой по окружности, которое передаёт движение приводному ремню.

Все детали, обрабатываемые на токарных станках, имеют ось вращения.

На рис. 4.2 представлена схема токарной обработки.

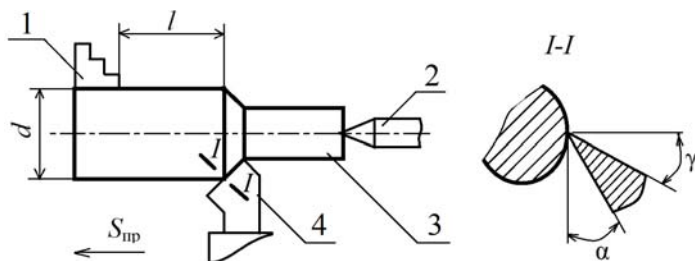


Рис. 4.2 – Схема токарной обработки

Между трёхкулачковым патроном 1 и центром 2 закреплена заготовка 3, которая обрабатывается режущим инструментом 4. Режущая кромка инструмента называется клином. Заготовка вращается вокруг своей оси, а режущий инструмент перемещается вдоль оси в направлении, показанном на рисунке. В этом случае говорят о продольной подаче режущего инструмента.

При относительно коротких размерах заготовки ($l/d < 5$) допускается закрепление заготовки в одном трёхкулачковом патроне. Для заготовок большей длины ($5 < l/d < 12$) заготовка крепится с двух сторон с помощью центров или кулачкового патрона и центра. В разрезе I-I показаны передний γ и задний α углы резания. При больших углах клин становится острее и повышается эффективность обработки, но снижается прочность и увеличивается износ режущего инструмента. Острые углы применяются чаще для обработки мягких, пластичных материалов, а тупые – для обработки твёрдых и хрупких материалов заготовки.

В последнее время не только в крупносерийном и массовом производстве, но и в серийном и мелкосерийном применяются токарные

станки-автоматы. Обработка деталей производится в автоматическом режиме по заранее заданной программе.

4.2. Обработка сверлением

Операции сверления применяют для получения отверстия в материале заготовки разного диаметра и качества поверхности (рис. 4.3). Собственно сверление обычно применяют для предварительной подготовки отверстия, используя режущий инструмент – сверло. Для повышения качества уже имеющегося отверстия применяют зенкерование.

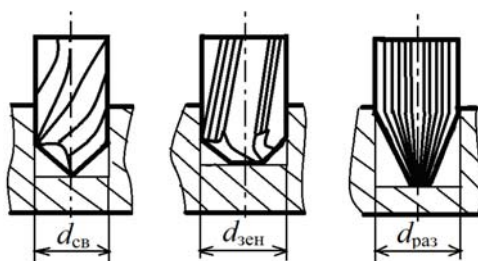


Рис. 4.3 – Операции сверления

Режущий инструмент-зенкер имеет от 3 до 6 групп режущих кромок. Для финишной обработки поверхности применяют развёртывание. Режущий инструмент-развёртка состоит из большого числа режущих кромок, что позволяет получить поверхность отверстия высокого качества.

Поскольку повышение качества обрабатываемой поверхности происходит за счёт снятия слоя материала, необходимо правильно выбрать припуск. При этом должно быть обеспечено соотношение диаметров сверления, зенкерования и развёртывания в соответствии с неравенством:

$$d_{св} < d_{зен} < d_{раз}$$

где $d_{св}$ – диаметр отверстия при сверлении; $d_{зен}$ – диаметр отверстия при зенкеровании; $d_{раз}$ – диаметр отверстия при развёртывании.

4.3. Холодная штамповка

Холодная штамповка – высокопроизводительный, малоотходный и достаточно точный метод формообразования деталей РЭС [20]. Данным методом изготавливаются каркасы, направляющие в каркасах, пластины магнитопроводов, клеммные зажимы, шайбы и другие детали. Исходным материалом для данного вида обработки являются листы, полосы, ленты из чёрных и цветных металлов, а также картон, резина, текстолит и другие.

Операции холодной штамповки можно классифицировать на разделительные и формообразующие (рис. 4.4).



Рис.4.4 – Операции холодной штамповки

Отрезкой называется отделение одной части материала от другой по незамкнутому контуру. Классическим способом такого отделения является использование гильотинных ножниц. Отрезку металлов (кроме магния и титана) толщиной более 1,5 мм проводят в холодном состоянии. Неметаллические материалы – гетинакс, текстолит, оргстекло нагревают. Такие материалы как фибра, картон, резина перед резкой увлажняют.

Гибкой называется операция по изменению положения одной части листа (полосы) относительно другой под определённым углом. Основную роль в процессе гибки играет технологическая пара пуансон – матрица. На рис. 4.5 представлены три вида гибки: простая, с прижимом и с калибратором. Цифрами обозначены: 1 – пуансон, 2 – заготовка, 3 – матрица. Буквами обозначены: r – внутренний радиус пуансона,

R – внешний радиус пуансона, O – ось прутка-заготовки, h – его толщина материала.

Допустимый максимальный изгиб заготовки определяется минимально допустимым внешним радиусом заготовки по формуле:

$$R_{\min} = kh,$$

где k – коэффициент, зависящий от свойств материала.

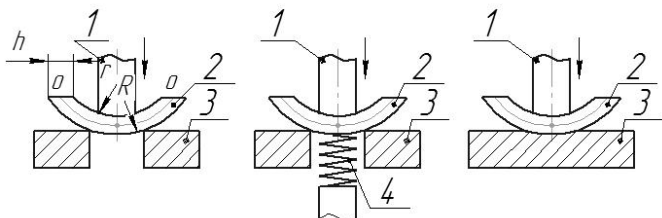


Рис. 4.5 – Простая гибка, гибка с прижимом и с калибратором

Преимуществом схемы гибки с прижимом является то, что заготовка не смещается в процессе её обработки. В результате получается деталь с более точной геометрической формой. Ещё большую точность обеспечивает схема с калибратором, который повторяет требуемую форму детали.

Вытяжка предназначена для получения полых деталей замкнутого профиля: цилиндрических, конических, ступенчатых (рис. 4.6).

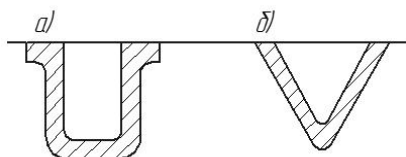


Рис. 4.6 – Вытяжка колпачков деталей:
а – цилиндрической формы, б – конической формы

Используют пластичные металлы – малоуглеродистые металлы и сплавы цветных металлов. Данный технологический приём используют для изготовления крышек, колпачков, корпусов различных деталей РЭС.

Схема холодного выдавливания представлена на рис. 4.7.

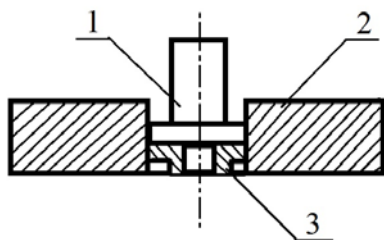


Рис. 4.7 Схема холодного выдавливания

На рисунке цифрами обозначены: 1 – пуансон, 2 – матрица, 3 – заготовка. Технологический процесс происходит с большими пластическими деформациями, материал должен обладать хорошей пластичностью. Соответственно выбирают алюминий, медь и их сплавы. Данным методом изготавливают втулки, радиаторы охлаждения, детали разъемов, корпуса конденсаторов, экраны и другие детали РЭС.

4.4. Технология изготовления деталей из пластмасс

Пластмассы являются ценным конструкционным и электротехническим материалом. Они легкие, хорошо противостоят коррозии, имеют низкий коэффициент трения, обладают хорошими изоляционными свойствами [25].

Основной составной частью пластмасс являются полимеры (синтетические органические соединения). Некоторые виды пластмасс состоят целиком из полимера, но чаще пластмасса представляет собой композицию из полимера, пластификатора, наполнителя и красителя. Иногда для управления скоростью пластификации в состав пластмасс добавляют катализатор или стабилизатор.

В зависимости от температурного характера затвердевания все пластмассы делятся на термопластичные и термореактивные. Термопластичные пластмассы при нагревании приобретают пластическое свойство или расплавляются, а при охлаждении возвращаются в твердое упругое состояние. Повторное их нагревание вновь приводит к пластичности. Термореактивные пластмассы при нагревании необратимо переходят в пластическое состояние с дальнейшим затвердеванием и приобретением упругих свойств. При повторном нагревании они остаются твердыми или сгорают не расплавляясь.

Основными методами изготовления деталей из пластмасс являются: компрессионное (прямое) прессование, литьевое прессование, литье под давлением.

Прямое прессование. Этот метод используется для изготовления деталей из термореактивных пластмасс с любым наполнителем и для некоторых термопластических материалов. Процесс компрессионного прессования протекает следующим образом. В загрузочную камеру пресс-формы загружается таблетированный или порошкообразный материал. При замыкании пресс-формы пресс-материал под воздействием тепла и давления, развиваемого прессом, переходит в пластическое состояние и заполняет формирующую полость. По окончании выдержки опрессованные детали выталкиваются из пресс-формы. Затем они подвергаются отделочным операциям.

В процессе прессования давление не остается постоянным. В начале прессования, когда материал переходит в пластифицированное состояние, заполняет формующую полость и начинает полимеризоваться, давление достигает максимума (10...50 МПа). К этому времени формующая полость (матрица) заполняется полностью, но изделие еще не отвердело. Для полного отверждения материала изделия необходима выдержка. При выдержке сохранение высокого давления не нужно, поэтому выдержку изделия в пресс-форме осуществляют при меньшем давлении (10...30 МПа).

Литьевое прессование. Этот метод применяется для изготовления деталей из термореактивных пластмасс с любым неслоистым и недлинно-волокнистым наполнителем. При литьевом прессовании загрузочная камера отделена от формующей полости. Пресс-материал загружается в загрузочную камеру, где подвергается воздействию тепла и давления. Перейдя в полужидкое состояние, он проходит по специальным каналам-летникам в формующую полость пресс-формы.

Процесс литьевого прессования состоит из следующих переходов: закрывание пресс-формы, установка на неё загрузочной камеры, заполнение пресс-материалом и нагрев материалов в закрытом состоянии под давлением; прессование изделия; подъём поршня загрузочной камеры и отделение её от пресс-формы; разъём пресс-формы и удаление из неё готового изделия.

Литьё под давлением. Этот способ применяется для изготовления деталей из термопластических пластмасс. Литьё под давлением осуществляется на специальных литьевых машинах. Литьевые машины быва-

ют двух видов: с поршневой подачей пресс-материала и с винтовой. Первые используются для получения изделий сложной конфигурации, с разной толщиной стенок, вторые – для изготовления деталей с постоянным поперечным сечением (труб, лент, различных профилей), т.е. используется способ экструзии, который представляет собой непрерывное выдавливание полимерного материала в вязко-текучем состоянии через отверстие определенного профиля.

Из листовых термопластических материалов изделия изготавливают методом вакуумного формования и с помощью сжатого воздуха.

4.5. Электрофизические и электрохимические методы

Электрофизические и электрохимические методы обработки применяют для обработки труднообрабатываемых, хрупких и других материалов, обработка которых другими способами затруднена. Такими материалами являются полупроводники, кварц, рубин, ферриты, твёрдые сплавы. К данной группе относят ультразвуковые, лучевые, магнитоимпульсные, электрохимические, электроэрозионные и другие методы обработки деталей РЭС.

Ультразвуковой метод. Суть метода в механическом воздействии на материал с частотой 18 000...20... Гц. Обработке подвергаются твёрдые и хрупкие материалы, частицы которых могут выкалываться при ударе. Например, ультразвуковое резание применяется для точной обработки наружных, внутренних, торцевых и плоских поверхностей, а также при сверлении, точении, фрезеровании. Профили поверхности при обычной (а) и ультразвуковой (б) резке представлены на рис. 4.8.

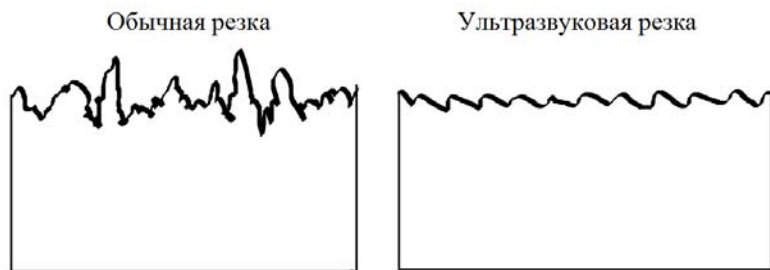


Рис. 4.8 – Сравнение профилей обычной и ультразвуковой резки

Ультразвуковое резание основано на сообщении режущей кромке инструмента ультразвуковых колебаний, что в несколько раз улучшает сход стружки, препятствует налипанию на режущую кромку, повышает стойкость инструмента в два раза и качество поверхности обрабатываемых изделий.

Электроэрозионная обработка. Метод основан на вырывании частиц материала с поверхности импульсом электрического разряда. Между электродами (анод, катод) создается высокое напряжение, электроды погружаются в жидкий диэлектрик (дистиллированная вода, керосин, масло). При сближении электродов или увеличении напряжения происходит пробой диэлектрика вследствие ионизации. Межэлектродная среда становится проводящей. Возникает электрический разряд, в канале которого образуется высокотемпературная плазма. Схема электроэрозионной обработки представлена на рис. 4.9.

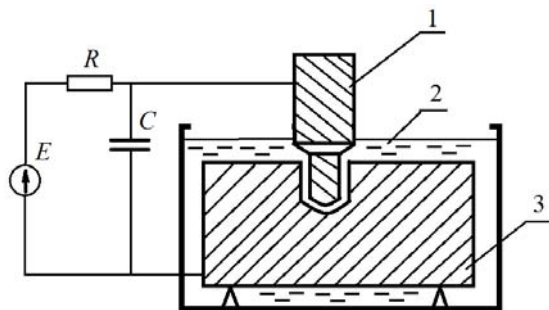


Рис. 4.9 – Схема электроэрозионной обработки

На рисунке цифрами обозначены: 1 – инструмент (катод), 2 – диэлектрик, 3 – обрабатываемая деталь (анод). Конденсатор C заряжается через резистор R от источника E , на выводах которого формируется напряжение 100...200 В. При достижении между электродами напряжения, равного пробойному, образуется канал сквозной проводимости, через который осуществляется разряд всей накопленной энергии. Прохождение тока через эрозионный участок прекращается после деионизации объема жидкости 2.

Электроэрозионная обработка может быть электроискровой и электроимпульсной. Сравнительная характеристика этих методов приведена в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Характеристики методов электроэрозионной обработки

Характеристики метода	Электроэрозионная обработка	
	Электроискровой метод	Электроимпульсный метод
Температура разряда, °С	10 000	4000...5000
Длительность импульсов	Короткие	Длинные
Качество обработки	Высокое	Низкое
Износ инструмента	Высокий	Низкий
Подключение инструмента	К катоду	К аноду

Электроэрозионными методами обрабатываются чаще всего токопроводящие материалы и сплавы.

4.6. Технология пайки

Одной из основных технологических операций, применяемых в процессе производства РЭС, является пайка. Пайка применяется для получения неразъёмного соединения деталей из различных материалов путём введения между ними расплавленного материала (*припоя*), имеющего более низкую температуру плавления, чем материалы соединяемых деталей.

Припой принято делить на две группы – мягкие и твёрдые. К мягким относятся припои с температурой плавления до 300°С, к твёрдым – выше 300°С. Припои также различаются по механической прочности. Мягкие припои имеют предел прочности при растяжении 15...100 МПа, а твёрдые – при 100...500 МПа. Твёрдыми припоями являются медно-цинковые (ПМЦ) и серебряные (ПСр) с различными добавками. Мягкими припоями являются оловянно-свинцовые сплавы (ПОС) с содержанием олова от 10 (ПОС-10) до 90% (ПОС-90), остальное свинец. В последнее время более серьёзно учитывается токсичность компонентов припоя, поэтому всё чаще начинают использовать бессвинцовые припои.

В процессе пайки используются также *флюсы*. Традиционным и до сих пор широко применяемым в электротехнике и радиоэлектронике флюсом является канифоль – хрупкое, стекловидное, аморфное вещество от тёмно-красного до светло-жёлтого цвета. Входит в состав хвойных деревьев и получается из живицы (смолистого вещества) после экстракции измельчённой древесины органическими растворителями или пере-

гонкой сырого таллового масла. Канифоль растворима в органических растворителях (спирте, ацетоне, эфире, бензоле, хлороформе), нерастворима в воде. Температура размягчения и плавления зависит от состава и колеблется от 50...70 до 100...120 °С. В составе преобладают смоляные кислоты (от 80 до 95%), основным компонентом которых является абиетиновая кислота. Флюсы на основе канифоли в полной мере удовлетворяют таким требованиям, как низкий ток утечки и низкая коррозионная активность.

Спаиваемые элементы деталей, а также припой и флюс вводятся в соприкосновение и подвергаются нагреву с температурой выше температуры плавления припоя, но ниже температуры плавления соединяемых деталей. В результате припой переходит в жидкое состояние и смачивает поверхности деталей. После этого нагрев прекращается, припой переходит в твёрдую фазу, образуя соединение.

Прочность соединения во многом зависит от зазора между соединяемыми деталями (от 0,03 до 2 мм), чистоты поверхности и равномерности нагрева элементов.

Схема ультразвуковой пайки и лужения. Технологию пайки можно, а во многих случаях даже целесообразно совмещать с уже рассмотренными нами электрофизическими и электрохимическими методами обработки деталей РЭС. На рис. 4.10 представлена схема ультразвуковой пайки и лужения.

Лужение – нанесение тонкого слоя припоя на поверхность металлических изделий. Лужение производится для защиты металла от коррозии или для подготовки к пайке.

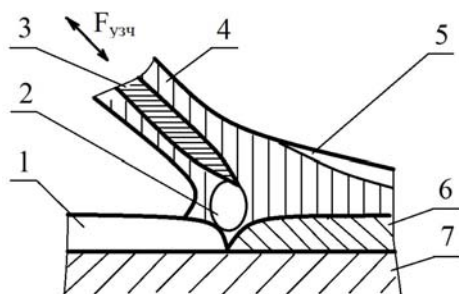


Рис. 4.10 – Схема ультразвуковой пайки и лужения

Цифрами на рисунке обозначены: 1 – оксидная плёнка; 2 – контакт расплавленного припоя с «чистым» металлом, ещё не обработанным

припоем; 3 – жало паяльника; 4 – расплавленный припой; 5 – остатки окислов; 6 – смешанный слой припоя с «чистым» металлом; 7 – «чистый» металл.

Для пайки алюминия и его сплавов применяют способ удаления окисной плёнки, основанный на её механическом разрушении интенсивными ультразвуковыми колебаниями. Упругие колебания паяльника $F_{\text{узч}}$ происходят с частотой 18...22 кГц. Они вызывают периодические растяжения и сжатия частиц жидкого припоя. В результате в расплавленном припое происходят кавитационные процессы. При этом возникают большие ударные импульсы, воздействующие на жидкий припой и поверхность детали. Происходит разрушение окисной плёнки. Раздробленные частицы окисной плёнки, обладающие меньшей плотностью, всплывают на поверхность припоя и он беспрепятственно обрабатывает очищенную поверхность металла. Метод позволяет облудить всю поверхность детали, с которой сняты окисные плёнки, в то время как при механическом удалении плёнки обслуживаются только отдельные защищенные участки.

Интенсивность ультразвуковых колебаний составляет 25...100 Вт/см². Зона такой интенсивности – 3...4 мм. Скорость лужения достигает от долей секунды до 1...2 секунд в зависимости от температуры поверхности детали. Длительное воздействие кавитации нежелательно, так как может произойти разрушение обрабатываемой детали РЭС.

Лазерная пайка. Микроминиатюризация элементов и создание функционально-микроэлектронных устройств (СБИС, микропроцессоров) вызвали особые проблемы в области сборки электронных модулей. Плотность транзисторов на кристалле удваивается каждые два года (закон Мура) и уже превысила 20 миллионов на квадратный сантиметр. Технология монтажных соединений постоянно совершенствуется, так как, согласно правилу Рента число сигнальных выводов микросхем определяется соотношением:

$$n = qN^R,$$

где q – коэффициент связности микроэлементов в структуре изделия; N – степень интеграции (количество элементов в кристалле); R – показатель Рента (0,5...0,74).

В этой связи всё шире применяется лазерная пайка, схема которой представлена на рис. 4.11.

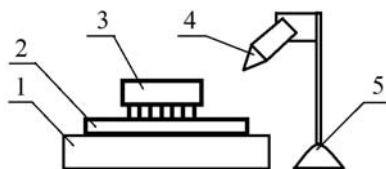


Рис. 4.11 – Схема лазерной пайки

На схеме цифрами обозначены: 1 – координатный стол, 2 – печатная плата, 3 – интегральная микросхема, 4 – лазер, 5 – координатная система.

Лазерное излучение в виде сфокусированного луча создаёт высокую концентрацию энергии ($10^8 \dots 10^9$ Вт/см²) на поверхности материала, что вызывает локальный нагрев с высокой скоростью и незначительной зоной термического влияния.

Интенсивность лазерного луча убывает по экспоненциальному закону:

$$I(x) = I_0 k e^{-\gamma x},$$

где x – глубина проникновения, I_0 – интенсивность лазерного излучения на поверхности, k – коэффициент поглощения материала, γ – степень поглощения.

Отклоняющая система по заранее заданной программе перемещает лазерный луч от вывода к выводу. Применяют также многолучевые схемы.

Лазерная пайка позволяет выполнять монтаж термочувствительных элементов, при этом кратковременное тепловое воздействие (20...30 мс) при мощности 20...30 Вт снижает степень окисления припоя. Возможна пайка модулей с высокой плотностью монтажа и малым шагом выводов. Применение лазерной пайки позволяет автоматизировать весь технологический цикл с одновременным проведением лазерного контроля.

Недостатком лазерной пайки является высокая стоимость применяемого оборудования, поэтому данный метод применяется чаще всего при крупносерийном и массовом производстве.

5. НАДЁЖНОСТЬ РЭС

5.1. Общие сведения о надёжности

Выпускаемые промышленностью радиоэлектронные средства предназначены для выполнения заданных функций в течение определенного времени. Способность изделий безотказно и эффективно функционировать характеризуется показателями надежности, отражающими определенные свойства изделия. В отличие от других физических величин надёжность не может быть непосредственно измерена, а может быть только количественно оценена или предсказана [1, 18]. Это явилось одной из важнейших причин возникновения нового научного направления – *теории надёжности*.

Основные термины определения надёжности техники установлены ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения». Надёжность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Надёжность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств [5, 6].

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки. Безотказность в той или иной степени свойственна объекту в любом из возможных режимов его существования. В основном безотказность рассматривается применительно к его использованию по назначению, но во многих случаях необходима оценка безотказности при хранении и транспортировании объекта. Необходимо подчеркнуть, что показатели безотказности вводятся либо по отношению ко всем возможным отказам объекта, либо по отношению к какому-то одному типу (типам) отказа с указанием на критерии отказа (отказов).

Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путём технического обслуживания и ремонта. Термин «ремонтопригодность» традиционно трактуется в широком смысле.

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

Сохраняемость – свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции в течение и после хранения и (или) транспортирования. В процессе хранения и транспортирования объекты подвергаются неблагоприятным воздействиям, например, колебаниям температуры, действию влажного воздуха, вибрациям и т.п. В результате после хранения и (или) транспортирования объект может оказаться в неработоспособном и даже в предельном состоянии. Сохраняемость объекта характеризуется его способностью противостоять отрицательному влиянию условий и продолжительности его хранения и транспортирования.

Свойства надежности объекта тесно связаны с возможными состояниями изделия. Каждое из них характеризуется совокупностью значений параметров, описывающих состояние объекта, а также качественных признаков, для которых не применяют количественные оценки. Номенклатуру этих параметров и признаков, а также пределы допустимых их изменений устанавливают в нормативно-технической и(или) конструкторской (проектной) документации. Диаграмма состояний и переходов между ними представлена на рис. 5.1.

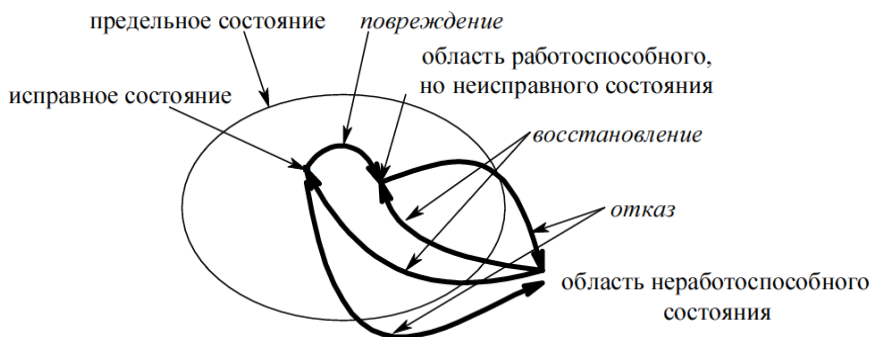


Рис. 5.1 – Диаграмма состояний изделия (объекта)

Исправное состояние – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Неисправное состояние – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Работоспособное состояние – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Работоспособный объект в отличие от исправного должен удовлетворять лишь тем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению. Работоспособный объект может быть неисправным, например, если он не удовлетворяет эстетическим требованиям, причем ухудшение внешнего вида объекта не препятствует его применению по назначению.

Неработоспособное состояние – состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Для сложных объектов возможны частично неработоспособные состояния, при которых объект способен выполнять требуемые функции с пониженными показателями или способен выполнять лишь часть требуемых функций, в этом случае можно сказать, что объект «правильно функционирует». Переход объекта из одного состояния в другое обычно происходит вследствие событий, которые характеризуют следующие понятия:

- *повреждение* – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния;
- *отказ* – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Разнообразие отказов требует введения их классификации.

Для РЭС с программным обеспечением характерно также возникновение сбоев в работе, которые могут приводить к нарушению как исправного, так и работоспособного состояния объекта. Классификация отказов осуществляется по характеру изменения состояния изделия до

момента возникновения отказа. В этой связи различают внезапный и постепенный отказы.

Внезапный отказ – отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значения одного или нескольких параметров изделия.

Постепенный отказ – отказ, возникающий в результате постепенного изменения значения одного или нескольких параметров изделия.

Внезапные отказы часто являются следствием дефектов производства. Наступлению постепенного отказа предшествует непрерывное и монотонное изменение одного или нескольких параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции. Ввиду этого появляется возможность предупредить наступление отказа или принять меры по устранению (легализации) его нежелательных последствий. Четкой границы между внезапными и постепенными отказами, однако, провести не удастся. Механические, физические и химические процессы, которые составляют причины отказов, как правило, протекают во времени достаточно медленно. Однако собственно отказ происходит внезапно. Если по каким-либо причинам своевременное обнаружение предпосылок к отказу оказалось невозможным, то отказ придется признать внезапным. По мере совершенствования расчётных методов и средств контрольно-измерительной техники, позволяющих своевременно обнаруживать источники возможных отказов и прогнозировать их развитие во времени, всё большее число отказов будет относиться к категории постепенных. Можно сказать, что внезапный отказ – это отказ, наступление которого не может быть предсказано предварительным контролем или диагностированием.

5.2. Показатели безотказности невосстанавливаемых изделий

Большинство комплектующих элементов и некоторые виды РЭС относятся к невосстанавливаемым изделиям. При анализе их надежности достаточно ограничиться рассмотрением только показателей безотказности. *Вероятностью безотказной работы $P(t)$* называют вероятность того, что в заданном интервале времени $(0, t)$ или просто за время t изделие не откажет:

$$P(t) = P\{\theta > t\},$$

где θ – случайная величина, характеризующая время работы изделия до отказа.

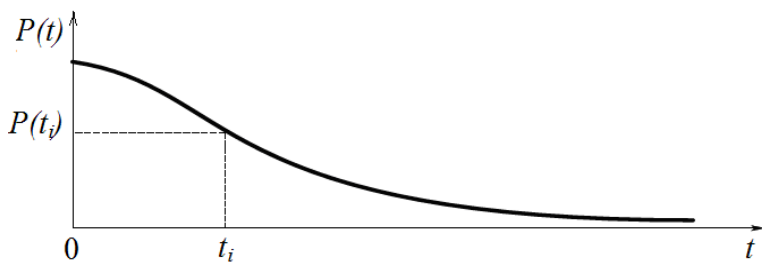


Рис. 5.2 – Типичный вид функции безотказной работы РЭС

Типичный график функции $P(t)$ приведен на рис. 5.2.

Математическое определение $P(t)$ без дополнительных показателей весьма затруднительно. Но учитывая, что величина $P(t_i)$ характеризует долю работоспособных изделий, остающихся к моменту времени t_i , появляется возможность определения вероятности безотказной работы по результатам испытаний:

$$\bar{P}(t) = \frac{N(t)}{N_0} = 1 - \frac{n(t)}{N_0},$$

где N_0 – общее число изделий, поставленных на испытания; $N(t)$ – число изделий, исправных в момент времени t ; $n(t)$ – число изделий, отказавших на интервале $(0, t)$.

При $N_0 \rightarrow \infty$ функция экспериментального распределения будет стремиться к функции теоретического распределения вероятностей.

Вероятность безотказной работы может быть определена и для произвольного интервала времени (t_0, t) , что на практике соответствует работе изделия еще до момента t_0 . В этом случае говорят об условной вероятности безотказной работы $P(t_0, t)$, имея в виду, что в момент времени t_0 (в начале наработки) изделие было работоспособно. Условная вероятность определяется:

$$P(t_0, t) = P\{\theta \geq t_0, \theta \geq t\} = \frac{P(t)}{P(t_0)},$$

где $P(t_0)$, $P(t)$ – вероятностные безотказные работы на интервалах времени $(0, t_0)$ и $(0, t)$ соответственно.

Вероятность отказа $Q(t)$ – это вероятность того, что в заданном интервале времени $(0, t)$ изделие откажет, т.е.

$$Q(t) = P\{\theta < t\}.$$

Поскольку $P(t)$ и $Q(t)$ образуют полную группу несовместных событий, то

$$P(t) + Q(t) = 1.$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ есть условная плотность вероятности отказа изделия в некоторый момент времени наработки при условии, что до этого момента отказов не было:

$$\lambda(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \frac{1}{(1 - Q(t))} = \frac{\varphi(t)}{P(t)},$$

где $\varphi(t)$ – плотность распределения наработки до отказа, иногда называется частотой отказов.

В табл. 5.1 в качестве примера приведены параметры надёжности некоторых резисторов.

Таблица 5.1. Параметры надёжности резисторов

Тип резистора	C2-23	C2—29B	C2-33H
Интенсивность отказов, 1/ч	$2 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$
Наработка на отказ, ч	50 000	25 000	20 000

Типичный график изменения интенсивности отказов серийных РЭС от времени приведен на рис. 5.3.

График характеризуется тремя явно выраженными периодами: приработки I; нормальной работы II; износа III.

Первый период эксплуатации РЭС $(0 \dots t_1)$ называется периодом приработки. В это время наблюдаются приработочные отказы, причиной которых является наличие бракованных или низконадежных элементов в составе РЭС.

Электрические и механические нагрузки, приходящиеся на компоненты РЭС, в этот период могут превосходить их электрическую и механическую прочность.

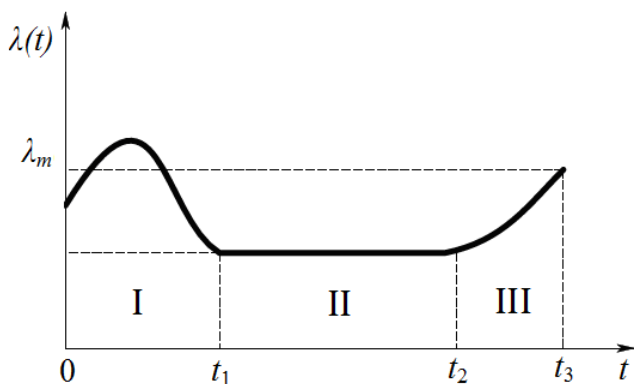


Рис. 5.3 – Функция интенсивности отказов РЭС

Период приработки продолжается от нескольких до сотен часов (доли и единицы процента от времени эксплуатации во втором периоде), что связано с быстрым выходом некачественных компонентов из строя. Данный вид отказов может быть следствием конструкторских (неудачная компоновка), технологических (некачественное выполнение сборки) и эксплуатационных (нарушение режимов работы) ошибок.

Второй период ($t_1 \dots t_2$) называется периодом нормальной эксплуатации. Он характеризуется минимальной интенсивностью отказов, которая имеет почти постоянное значение на интервале времени вплоть до десятков тысяч часов, что может превышать время морального старения РЭС. В этот период наблюдаются в основном внезапные отказы. Такие отказы предупредить практически не представляется возможным вследствие действия случайных факторов, тем более что к этому времени в РЭС остаются только полноценные компоненты, срок износа и старения которых ещё не наступил.

Третий период ($t_2 \dots t_3$) называется периодом износа и старения. Отказы возникают в результате износа механических компонентов РЭС и старения материалов, из которых сделаны другие электро-радиоэлементы. График функции на участке ($t_2 \dots t_3$) представляет собой монотонно возрастающую функцию, крутизна которой тем меньше, а протяженность во времени тем больше, чем более качественные материалы и комплектующие изделия использованы в изделии. Завершается III период, а вместе с ним и прекращение эксплуатации РЭС, когда интенсивность ее отказов приблизится к максимально допустимой для данной конструкции (точка t_3 на рис. 5.3).

Средняя наработка до отказа T_{cp} представляет собой математическое ожидание $M(t)$ времени исправной работы t изделия до первого отказа:

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} t\varphi(t)dt.$$

Вид функции $\varphi(t)$ определяется конкретным законом распределения случайной величины t . Статистически T_{cp} находится как средне-арифметическое значение реализации случайного интервала времени работы изделия до первого отказа:

$$T_{cp} = \sum_{i=1}^{N_0} \frac{\theta_i}{N_0},$$

где θ_i – время наработки i -го изделия до первого отказа;

N_0 – число исправных изделий, поставленных на испытание.

5.3. Способы повышения надёжности РЭС

В последнее время проблема надёжности РЭС заметно обострилась [32]. Объясняется это следующими обстоятельствами: радиоэлектронные средства заметно усложнились в схемотехническом отношении, используются ИМС высокой степени интеграции, полностью цифровая обработка сигналов; ужесточились условия, при которых происходит эксплуатация РЭС; повысились требования к качеству функционирования РЭС; повысилась степень автоматизации работы технических устройств.

Основными причинами отказа РЭС являются следующие: нарушение работоспособности электрорадиоэлементов и отказы элементов конструкции; ошибки при схемотехническом, конструкторском и технологическом проектировании; нарушение технологии и условий эксплуатации.

Для повышения надёжности применяется ряд способов, наиболее действенным из которых является резервирование (рис. 5.4).

Различают пять видов резервирования:

- структурное, предусматривающее использование избыточных структурных элементов;



Рис. 5.4 – Пути повышения надёжности РЭС

- временное – с использованием резерва по времени;
- нагрузочное – с использованием запаса по нагрузке;
- функциональное, при котором применяются компоненты с избыточными функциями, например, многокомпонентные ФАР;
- информационные, при которых используется избыточная информация.

Классификация способов структурного резервирования представлена в табл. 5.2.

Для оценки надёжности РЭС применяются два метода.

1. **Оценка факторов отказов РЭС.** Испытуемые РЭС ставятся в условия, соответствующие условиям реальной эксплуатации, ведётся наблюдение за выполнением ими заданных функций и фиксируются отказы. Затем по известным формулам математической статистики определяются показатели надёжности (наработка на отказ, вероятность безотказной работы и т.д.).

Таблица 5.2. Классификация способов резервирования

Признак классификации	Способ резервирования
Способ включения резерва	Постоянное резервирование
	Резервирование с замещением
Схема включения резерва	Общее резервирование
	Раздельное резервирование
Состояние резерва	Нагруженный резерв
	Облегчённый резерв
	Ненагруженный резерв
Кратность резервирования	Однократное резервирование
	Многократное резервирование

Реализация такого плана испытаний требует соблюдения следующих условий:

- число наблюдаемых изделий должно быть достаточно большим (для обеспечения достоверности результатов);
- группа изделий должна быть однородна по составу, изделия изготовлены по единому технологическому процессу;
- необходимо точное воспроизведение условий эксплуатации и создание реальных воздействий на РЭС, требуется непрерывно следить за выполнением изделиями заданных функций.

Недостатком метода является то, что он непригоден для сложных и дорогих изделий, а также то, что он не всегда вскрывает причины отказов.

2. Оценка отказов РЭС по определяющим параметрам. При данном методе производится выбор определяющих параметров на основе изучения факторов, влияющих на изменение этих параметров.

Например, для потенциометра работоспособность определяется такими параметрами, как напряжение источника питания, точность намотки сопротивления, точность перемещения подвижного контакта, изменение омического сопротивления провода, точность изготовления каркаса потенциометра.

Данный метод позволяет выявить основные причины возникновения отказов и сделать рекомендации по их устранению.

Недостатком метода является необходимость предварительного изучения факторов, влияющих на надёжность, определение степени их влияния.

Кроме того, определяющие параметры обычно влияют друг на друга, что существенно затрудняет анализ причин отказов.

Резюмируя сказанное, отметим, что для создания высоконадёжных РЭС необходимо выполнять следующие условия:

- ЭРЭ и материалы выбирать в строгом соответствии с техническими условиями;
- минимизировать конструкционные отказы на основе рассмотрения альтернативных проектных решений;
- полное обеспечение регламента технологического процесса;
- выявление «узких мест» и их устранение с использованием резервирования.

5.4. Автоматизированный расчёт надёжности РЭС

Программа «Искра» предназначена для автоматизированного расчёта надёжности РЭС. Работа программы основана на использовании распространённой системы управления базами данных (СУБД) Microsoft Access 2000. Программа работает на операционных системах Windows 2000/ XP/7/8/10 и не предъявляет серьёзных требований к ресурсам.

Программа производит расчёт по внезапным отказам исходя из последовательной схемы надёжности, при этом принимаются допущения:

- отказ любого элемента приводит к полному отказу РЭС;
- интенсивности отказов всех элементов не зависят от времени $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$;
- все ЭРЭ функционируют постоянно и одновременно;
- отказы ЭРЭ взаимно независимые.

Отметим, что в реальных условиях ни одно из этих условий не соблюдается, так как ЭРЭ имеют разное функциональное назначение и их отказы приводят к разным последствиям в плане функционирования РЭС в целом. Имеют место также процессы износа и старения, влияющие на интенсивность отказов элементов. Не все элементы устройства работают постоянно и с одинаковой нагрузкой, а отказ одного элемента (например, отказ светодиода индикации подачи напряжения сети 220 В на осциллограф) не обязательно приводит к отказу всего устройства.

Тем не менее, исходя из принятых допущений, вероятность безотказной работы РЭС во времени определяется выражением:

$$P(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t),$$

где $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента РЭС; N – количество элементов в устройстве.

Основываясь на принятых допущениях, полагаем, что закон распределения времени безотказной работы любого элемента является экспоненциальным:

$$P_i = e^{-\lambda t},$$

где λ – интенсивность отказа i -го элемента.

Тогда

$$P(t) = \prod_{i=1}^N e^{-\lambda t} = e^{\sum_{i=1}^N \lambda_i t} = e^{-\Lambda t},$$

где $\Lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i$ – интенсивность отказа элементов j -го типа для данной электрической нагрузки и условий окружающей среды.

Уровень электрической нагрузки ЭРЭ оценивается величиной коэффициента нагрузки K_n . Эта величина равна фактической максимальной величине контролируемого параметра (напряжения, мощности рассеяния и т.д.) к максимальному номинальному значению этого же параметра.

Увеличение коэффициента нагрузки приводит к более высокой интенсивности отказов ЭРЭ, снижению их надёжности. То же самое происходит при ужесточении условий эксплуатации: повышении температуры, уровня влажности, силы механических воздействий, давления. Поэтому в программу расчёта надёжности по внезапным отказам введены коэффициенты, учитывающие действие вибрации и ударных нагрузок K_1 , влажности K_2 и пониженного давления K_3 .

Для определения интенсивности отказов в программе используется формула:

$$\Lambda = K_1 K_2 K_3 \sum_{i=1}^m n_i \lambda_i,$$

где m – количество групп ЭРЭ с одинаковыми интенсивностями отказов (например, все соединения пайкой или все конденсаторы слюдяные).

Вероятность безотказной работы РЭС определяется по формуле:

$$P(t) = e^{-\Lambda t}.$$

где t – время непрерывной работы РЭС.

Работа с программой состоит из двух этапов – подготовительные операции и непосредственно расчёт. Вначале в базу данных вносятся значения интенсивности отказов ЭРЭ, которые входят в состав выбранной РЭС. Для этого следует подключиться к базе данных (БД), выбрав в меню «Информация» пункт «Интенсивность отказов».

В главном окне программы появятся две связанные друг с другом таблицы. Верхняя таблица, в которой указаны типы ЭРЭ, является главной. Нижняя таблица, в которой представлены наименования всех ЭРЭ и интенсивности отказов, является дочерней. При удалении типа ЭРЭ из верхней таблицы удаляются все наименования ЭРЭ, которые принадлежали данному типу. Под каждой таблицей расположена навигационная панель для работы с данными таблицы. С помощью панели можно добавлять, удалять и модифицировать записи, а также осуществлять перемещение и по набору данных. В БД заранее внесены показатели наиболее распространённых ЭРЭ.

Кроме того, в БД хранятся поправочные коэффициенты, учитывающие условия эксплуатации, необходимые для расчета надёжности. При необходимости их можно изменить, выбрав пункт меню «Условия эксплуатации РЭС».

Расчёт надёжности начинается с создания записи о РЭС. Указывается название устройства, его краткое описание, требуемое время эксплуатации, условия эксплуатации и, при необходимости, замечания. Время эксплуатации выбирается исходя из функционального назначения устройства. Допускается выбрать время эксплуатации РЭС с учётом среднего времени работы устройства в течение суток. Например, лабораторный стенд используется в среднем 6 часов в сутки, а электросчётчик должен работать 24 часа в сутки.

После записи этой информации в БД следует заполнить список ЭРЭ, входящих в состав рассматриваемой РЭС, нажав интерактивную кнопку с значком микросхемы в панели навигации. Ввиду большого количества ЭРЭ для их упорядочения и систематизации они разбиты на типы. Список ЭРЭ формируется путём добавления новых элементов из полного списка, имеющегося в БД программы. Добавить ЭРЭ можно либо двойным щелчком мыши по этому элементу, либо нажатием знака «+» в панели под списком уже введённых в базу данных ЭРЭ. Ошибоч-

но введенный элемент удаляется из списка при нажатии клавиши «←» в той же панели.

После создания списка ЭРЭ следует вернуться в панель информации всего устройства, нажав кнопку «РЭС». В нижней части указанной панели будут отображаться результаты расчета надёжности: интенсивность отказов, среднее время безотказной работы (наработка на отказ), вероятность безотказной работы. Результаты расчёта можно сохранить в виде текстового файла или распечатать путём выбора соответствующего пункта меню программы.

Продemonстрируем принцип работы программы «Искра» на конкретном примере.

На рис. 5.5 представлена принципиальная схема усилителя низкой частоты (УНЧ). Необходимо рассчитать параметры надёжности УНЧ. К схеме прилагается перечень всех элементов, на основании которого, пользуясь справочной информацией, находим интенсивности отказов элементов, объединяя их в группы.

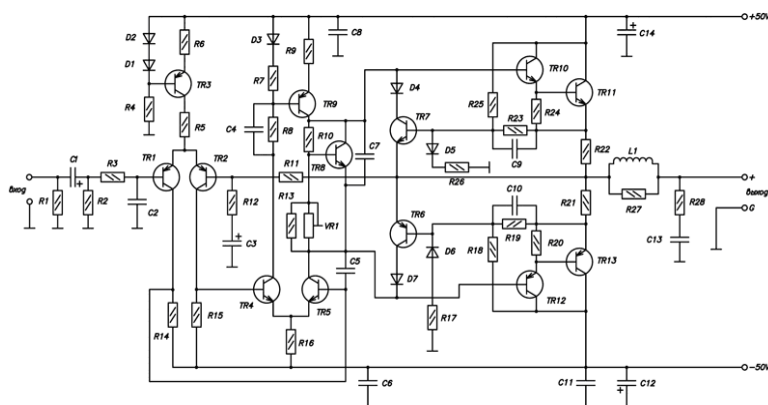


Рис. 5.5 – Принципиальная схема усилителя низкой частоты

Усилитель низкой частоты состоит из таких элементов, как низкочастотные кремниевые транзисторы, импульсные кремниевые диоды, металлоплёночные резисторы, переменный объёмный резистор, слюдяные конденсаторы, катушка индуктивности. Все эти элементы обладают разной интенсивностью отказов, что связано с их конструкцией и технологией изготовления. Тем не менее, в пределах группы считаем интенсивность отказов элементов постоянной. Количество паяных соединений определяем по табл. 5.3.

Таблица 5.3. Определение количества соединений пайкой в схеме

Порядковый номер группы	Обозначение элемента	Количество контактов	Количество в схеме	Количество соединений пайкой
1	Резистор металлоплёночный	2	28	56
2	Резистор переменный объёмный	3	1	3
3	Диод импульсный кремниевый	2	7	14
4	Конденсатор слюдяной	2	14	28
5	Транзистор НЧ кремниевый	3	13	39
6	Катушка индуктивности	2	1	2
ИТОГО				142

После внесения данных в программу получаем результаты, отображённые на рис. 5.6.

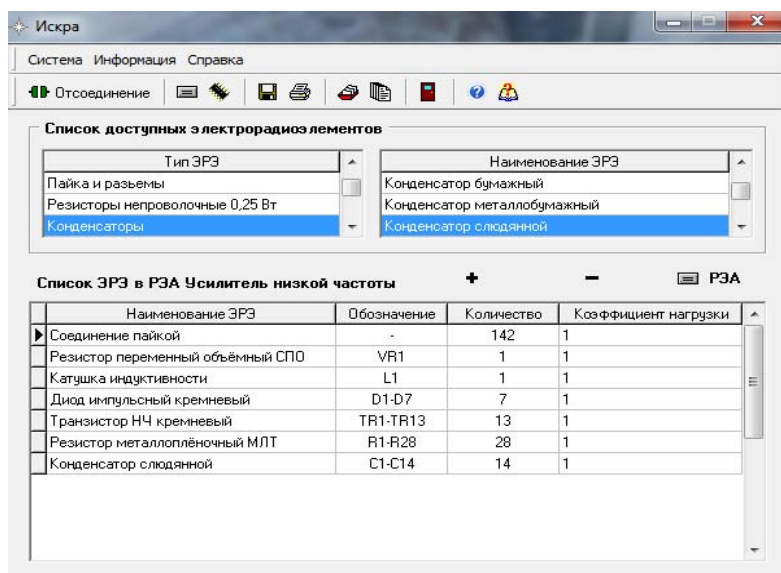


Рис. 5.6 – Результаты заполнения базы данных в программе «Искра»

Исходя из назначения устройства, выбираем время эксплуатации – 18250 часов, условия эксплуатации – лабораторные (температура

20–40⁰С, влажность 60–70%), атмосферное давление примерно соответствует высоте от 0 до 1 км над уровнем моря. После ввода указанных данных получаем данные расчёта параметров надёжности (рис. 5.7).

Среднее время безотказной работы (наработка на отказ) получилось выше требуемого времени эксплуатации. Следовательно, с точки зрения надёжности РЭС удовлетворяет заявленным требованиям.

В случае невыполнения данного условия принимаются меры по повышению надёжности устройства. Такими мерами могут быть изменение теплового режима устройства (введение принудительного охлаждения), применение экранирования для защиты от электромагнитного излучения, стабилизация частоты с помощью кварцевых элементов и т.д. В рамках программы доступна только замена данных ЭРЭ на более надёжные, с меньшей интенсивностью отказов.

The screenshot shows the 'Искра' (Iskra) software window. The title bar says 'Искра'. Below the title bar is a menu bar with 'Система', 'Информация', and 'Справка'. Below the menu bar is a toolbar with icons for 'Отсоединение', a folder, a lightbulb, a floppy disk, a printer, a document, a red square, a globe, and a person. The main area is titled 'Радиозлектронная аппаратура'. It contains several input fields: 'Название РЭА:' with the value 'Усилитель низкой частоты', 'Время эксплуатации, час:' with the value '18250', 'Описание РЭА:' with the value 'УНЧ для сабвуфера', and 'Примечание:' with the value 'Опытный образец'. Below these is a section titled 'Условия эксплуатации РЭА' with three dropdown menus: 'Условия эксплуатации (вибрация и удары):' set to 'Лабораторные', 'Температура и влажность:' set to 'Влажность 60-70%, Температура 20-40 °C', and 'Высота, км. (атмосферное давление):' set to '0-1'. Below the input fields is a row of navigation icons. At the bottom is a section titled 'Результаты расчёта надёжности' with three rows of results: 'Интенсивность отказов, 1/час:' with the value '5,25200007744134E-5', 'Среднее время безотказной работы, час:' with the value '19040,3652942667', and 'Вероятность безотказной работы:' with the value '0,591437060544093'.

Радиозлектронная аппаратура	
Название РЭА:	Усилитель низкой частоты
Время эксплуатации, час:	18250
Описание РЭА:	УНЧ для сабвуфера
Примечание:	Опытный образец
Условия эксплуатации РЭА	
Условия эксплуатации (вибрация и удары):	Лабораторные
Температура и влажность:	Влажность 60-70%, Температура 20-40 °C
Высота, км. (атмосферное давление):	0-1
Результаты расчёта надёжности	
Интенсивность отказов, 1/час:	5,25200007744134E-5
Среднее время безотказной работы, час:	19040,3652942667
Вероятность безотказной работы:	0,591437060544093

Рис. 5.7 – Результаты расчета надёжности в программе «Искра»

Если при повторном расчёте среднее время безотказной работы окажется больше требуемого времени эксплуатации, поставленную задачу можно считать выполненной.

Автор выражает благодарность кандидату технических наук М.А. Санникову за проделанную работу по написанию программы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Надёжность систем и техногенный риск / В.А. Акимов, В.Л. Лапин, В.М. Попов [и др.]. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002. – 368 с.
2. Баканов, Г.Ф. Конструирование и производство радиоаппаратуры: учеб. пособие / Г.Ф.Баканов, С.С.Соколов. – М.: Издат. центр «Академия», 2011. – 384 с.
3. Баканов, Г.Ф. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств: учеб. пособие / Г.Ф.Баканов, С.С.Соколов, В.Ю. Суходольский; под ред. И.Г.Мироненко. – М.: Издат. центр «Академия», 2007. – 368 с.
4. Белоусов, О.А. Основные конструкторские расчеты в РЭС: учеб. пособие / О.А.Белоусов, Н.А. Кольтюков, А.Н.Грибков. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 84 с.
5. Боровиков, С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности / С.М.Боровиков. – Минск: Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.
6. Бородин, С.М. Обеспечение надёжности при проектировании РЭС: учеб. пособие / С.М.Бородин. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2010. – 106 с.
7. Гормаков, А.Н. Конструирование и технология электронных устройств и приборов. Печатные платы / А.Н. Гормаков, Н.А.Воронина. – Томск: Изд-во ТГУ, 2006. – 164 с.
8. Дядик, В.Ф. Статистические методы контроля и управления: учеб. пособие / В.Ф. Дядик, С.А. Байдали, Т.А. Байдали. – Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2011. – 144 с.
9. Основы проектирования электронных средств: учеб. пособие. Ч. 1 / А.В. Зеленский, В.А. Зеленский, Г.Ф. Краснощекова [и др.]. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2007. – 243 с.
10. Основы проектирования электронных средств: учеб. пособие. Ч. 2 / А.В. Зеленский, В.А. Зеленский, Г.Ф. Краснощекова [и др.]. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 167 с.
11. Радиоэлектронная аппаратура и основы её конструкторского проектирования: учеб.-метод. пособие для студентов специальностей «Моделирование и компьютерное проектирование» и «Проектирование

и производство РЭС» / [Н.И. Каленкович и др.]. – Минск: Изд-во БГУИР, 2008. – 200 с.

12. Кечиев, Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстроедействующей аппаратуры / Л.Н. Кечиев. – М.: Издат. дом «Технологии», 2007. – 616 с.

13. Князев, А.Д. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры с учётом электромагнитной совместимости / А.Д.Князев, Л.Н. Кечнев, Б.В.Петров. – М.: Радио и связь, 1989. – 222 с.

14. Кольтюков, Н.А. Основы эргономики и дизайна РЭС: учеб. пособие по курсовому проектированию / Н.А. Кольтюков, О.А. Беловусов. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 124 с.

15. Компонировка и конструкции микроэлектронной аппаратуры / ред.: Б.В.Высоцкий, В.Б.Пестряков, О.А. Патлин. – М.: Радио и связь, 1982. – 208 с.

16. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: учеб. для вузов / [К.И. Билибин и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. – 568 с.

17. Кофанов, Ю.Н. Автоматизация проектирования РЭС. Топологическое проектирование печатных плат: учеб. пособие / Ю.Н. Кофанов, А.В. Сарафанов, С.И. Трегубов. – 2 изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 2001. – 220 с.

18. Кофанов Ю.Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронных средств. – М.: Радио и связь, 1991. – 360 с.

19. Листьев, В.П. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие / В.П. Листьев. – М.: Московский государственный университет экономики, статистики и информатики, 2006. – 199 с.

20. Лопаткин, А.В. Конструирование и технология РЭС: учеб. пособие / А.В.Лопаткин. – Н.Новгород: Изд-во НГТУ, 2001. – 30 с.

21. Любченко, Е.А. Планирование и организация эксперимента: учеб. пособие / Е.А.Любченко, О.А.Чуднова. – Владивосток: Изд-во ТГЭУ, 2010. – 156 с.

22. Матвиевский, В.Р. Проектирование технических систем: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГИЭМ, 2003. – 103 с.

23. Медведев, А.М. Сборка и монтаж электронных устройств / А.М.Медведев. – М.: Техносфера, 2007. – 256 с.

24. Муромцев, Ю.Л. Информационные технологии проектирования радиоэлектронных средств: учеб. пособие / Ю.Л. Муромцев, Д.Ю. Муромцев, И.В.Тюрин. – М.: Издат. центр «Академия», 2010. – 384 с.

25. Носов, В.В. Основы конструирования приборов и экспериментальных установок: учеб. пособие / В.В Носов. – СПб.: Изд-во национального минерально-сырьевого университета «Горный», 2013. – 139 с.
26. Пирогова, Е.В. Проектирование и технология печатных плат: учеб. / Е.В.Пирогова. – М.: Форум, Инфа-М, 2005. – 560 с.
27. Сарафанов, А.В. Основы проектирования электронных средств: Техническое задание. Формирование и анализ: учеб. пособие / А.В. Сарафанов, С.И. Трегубов. – Красноярск: Изд-во Краснояр. гос. техн. ун-та, 2005. – 140 с.
28. Селиванова, З.М. Технология радиоэлектронных средств: учеб. пособие по курсовому проектированию / З.М. Селиванова. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 100 с.
29. Степаненко, И.П. Основы микроэлектроники: учеб. пособие / И.П. Степаненко. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 488 с.
30. Тютюнник, В.М. Информационные технологии проектирования РЭС. Основные понятия, архитектура, принципы: учеб. пособие / В.М. Тютюнник, Ю.Л. Муромцев, Л.П. Орлова. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. ун-та, 2004. – 96 с.
31. Фомин, А.В. Инженерные методы при обеспечении качества при проектировании ЭС / А.В.Фомин, О.Н.Умрихин, М.Ф.Митюшин. – М.: Изд-во МАИ, 2007. – 276 с.
32. Ямпурин, Н.П. Основы надёжности электронных средств: учеб. пособие / Н.П. Ямпурин, А.В. Баранова. – М: Издат. центр «Академия», 2010. – 240 с.

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Зеленский Владимир Анатольевич

ОСНОВЫ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Учебное пособие

Редактор Н.С. Куприянова
Доверстка Л.Р. Дмитриенко

Подписано в печать 21.03.2016. Формат 60х84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 5,0.

Тираж 300 экз. Заказ .

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С.П.Королева
(национальный исследовательский университет)»
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во СГАУ. 443086 Самара, Московское шоссе, 34.