

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ	6
ПРЕДИСЛОВИЕ	7
ВВЕДЕНИЕ	9
1. КОНСТРУКТОРСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЭС	16
1.1. Классификация РЭС	16
1.2. Требования к конструкциям РЭС.....	19
1.3. Методы конструирования РЭС	21
1.4. Стадии разработки РЭС	24
1.5. Влияние внешней среды на параметры РЭС.....	27
1.6. Элементная база РЭС	32
1.7. Материалы для элементов конструкций РЭС.....	33
1.8. Конструкторские расчёты.....	36
2. СОЕДИНЕНИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ РЭС	42
2.1. Компоновка элементов РЭС	42
2.2. Виды соединений и методы монтажа	44
2.3. Печатные платы	46
2.4. Межконтактные соединения из объёмного провода.....	58
3. ТЕХНОЛОГИЯ РЭС	61
3.1. Основные понятия и определения	61
3.2. Виды и структура технологических процессов	62
3.3. Разработка технологического процесса.....	65
3.4. Технологичность конструкции РЭС	67
4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РЭС	70
4.1. Обработка деталей точением.....	70
4.2. Обработка сверлением	72
4.3. Холодная штамповка.....	73
4.4. Технология изготовления деталей из пластмасс	75
4.5. Электрофизические и электрохимические методы	83
изготовления деталей РЭС.....	83
4.6. Технология пайки	85

5. ДОКУМЕНТИРОВАНИЕ КОНСТРУКТОРСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК	90
5.1. Общие сведения о конструкторской и технологической документации	90
5.2. Конструкторская документация	91
5.3. Технологические документы	98
6. НАДЁЖНОСТЬ РЭС	101
6.1. Общие сведения о надёжности	101
6.2. Показатели безотказности невосстанавливаемых изделий	104
6.3. Способы повышения надёжности РЭС	108
6.4. Автоматизированный расчёт надёжности РЭС в программной среде «Искра»	113
7. КАЧЕСТВО РЭС	119
7.1. Оценка качества конструкции РЭС	120
7.2. Точность параметров деталей РЭС	121
7.3. Качество поверхности деталей РЭС	125
8. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ	130
8.1. Цели и задачи планирования эксперимента	130
8.2. Параметры оптимизации и факторное пространство	132
8.3. Построение матрицы планирования	136
8.4. Реализация полнофакторного эксперимента	138
8.5. Дробный факторный эксперимент	139
8.6. Алгоритм построения статистической модели объекта	141
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	143

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

БИС – большая интегральная схема,
БД – база данных,
ДФЭ – дробный факторный эксперимент,
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,
ПФЭ – полный факторный эксперимент,
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.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Трудно представить современную жизнь без радиоэлектроники. Радиоэлектронные средства (РЭС) относятся к наиболее динамичной составляющей общего научно-технического прогресса, а их работа объединяет в себе принципы электроники, радиотехники, телекоммуникаций, информационных технологий. 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. Книга может быть полезна магистрантам специальности «Конструирование и технология электронных средств» при изучении дисциплин «Проектирование сложных систем», «Моделирование конструкций и технологических процессов производства электронных устройств». Вопросы, затронутые в учебном пособии, могут быть интересны аспирантам, обучающимся по направлению подготовки научно-педагогических кадров «Электроника, радиотехника и системы связи».

Подготовка учебного пособия была бы невозможна вне учебно-методической школы, существующей на кафедре конструирования и технологии электронных систем и устройств Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева.

Глубокую благодарность авторы выражают д-ру техн. наук, профессору В.М. Гречишникову и д-ру техн. наук, доценту В.Н. Астапову за полезные замечания, сделанные при рецензировании рукописи.

ВВЕДЕНИЕ

Основные термины и определения

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

Различают следующие виды проектирования:

- схемотехническое проектирование;
- конструкторское проектирование (конструирование);
- технологическое проектирование.

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

Конструирование производится с целью создания радиоэлектронных средств (РЭС), удовлетворяющих определённые запросы 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 – схемотехническом, 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, алюминиевые и магниевые сплавы, пластмассы. 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.

Эволюция РЭС

Первые устройства проводной телеграфной связи (русский изобретатель П.Л. Шиллинг) появились в 1832 г. Первое в мире устройство беспроводной связи – радиоприёмник, изобретённый А.С. Поповым, был продемонстрирован в 1895 г. Конструкционное исполнение первых РЭС напоминало аппаратуру проводной связи (деревянный ящик, монтаж неизолированным проводом, замыкание и прерывание контактов с помощью винтов). Установка РЭС на автомобили, железнодорожные составы, морские и речные суда привела к необходимости увеличения прочности и экранирования отдельных узлов с помощью металлического шасси. Увеличение серийности выпуска аппаратуры привело к созданию конструкторской иерархии (унификации и соподчинённости несущих базовых конструкций).

Для защиты аппаратуры танков и самолётов в 30–40-е гг. XX века были разработаны герметичные корпуса, которые устанавливались на виброизоляторы (амортизаторы). Требование существенной минимизации массы и объема авиационной и ракетно-космической аппаратуры (50–60-е гг.) привело к созданию микромодулей, печатных плат, полупроводниковых приборов, коаксиальных кабелей, полосковых линий, интегральных микросхем. Дальнейшее усложнение аппаратуры в 60–70-е гг. привело к появлению элементов функциональной микроэлектроники. Требования передачи больших объёмов информации на значительные расстояния подстегнуло развитие оптоэлектроники и волоконной оптики в 1970–1980-е гг. Начиная с 90-х годов прошлого столетия происходит

тесная интеграция электроники с информационными и телекоммуникационными технологиями. В настоящее время активно развивается наноэлектроника.

Принято различать следующие поколения РЭС, исходя из принципов их реализации и используемой элементной базы.

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

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

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

В конструкциях РЭС четвёртого поколения (80-90-е годы) применяются большие интегральные микросхемы (СБИС), многослойные печатные платы, гибкие печатные шлейфы, микрополосковые линии. В интегральной электронике сохраняется главный принцип дискретной электроники – разработка электрической схемы по законам теории цепей. Этот принцип обуславливает рост числа элементов микросхемы и межэлементных соединений по мере усложнения выполняемых ею функций. Однако повышение степени интеграции микросхем и связанное с этим уменьшение размеров элементов имеет определённые пределы из-за возникающих проблем технологии изготовления.

В РЭС пятого поколения находят широкое применение приборы функциональной микроэлектроники. Функциональная микроэлектроника предполагает принципиально новый подход, позволяющий реализовать определённую функцию аппаратуры без применения стандартных базовых элементов, используя физические явления в твёрдых телах. При этом локальному объёму твёрдого тела придаются такие свойства, которые необходимы для выполнения данной функции, и промежуточный этап представления этой функции в виде эквивалентной электрической схемы не требуется. Функциональные микросхемы могут выполняться не только на основе полупроводников, но и на основе таких материалов, как сегнетоэлектрики, материалы с фотопроводящими свойствами и др.

Для переработки информации можно использовать явления, не связанные с электропроводностью, например, оптические и магнитные явления в диэлектриках, закономерности распространения ультразвука.

Претерпела изменения и терминология. В 60 – 70-х годах употреблялись термины: РА – радиоаппаратура, при этом подразумевалась аналоговая аппаратура. Это аппаратура связи, радио-; теле- и аудиоаппаратура. Существовал также термин ЭА – электронная аппаратура, электронно-вычислительная аппаратура. В СССР производство РА управлялось МРП – Министерством радио промышленности, а производство ЭА управлялось МЭП – Министерством электронной промышленности. Начиная с 80-х годов почти вся аппаратура стала симбиозом РА и ЭА – получилась РЭА.

В современной аппаратуре всё большую роль играют не аппаратная часть, а программное обеспечение, которое встроено в аппаратуру. Чтобы отразить эти изменения, вместо РЭА чаще стала употребляться аббревиатура РЭС. Данный термин является в настоящее время наиболее широко применяемым.

Основные термины и определения

Как и всякая область знания, радиоэлектроника оперирует своими терминами, 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 используются (например, инструмент) для создания изделий основного производства.

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).

Теперь, исходя из рассмотренных понятий, перейдем к определениям РЭС, конструированию и технологии РЭС.

Как уже отмечалось, наряду с РЭС применяется термин РЭА. Уточним эти понятия. Под радиоэлектронной аппаратурой понимают изделие и его составные части, в основу функционирования которых положены принципы радиотехники и электроники. Включение в состав РЭА различных электромеханических исполнительных устройств, систем питания, средств самоконтроля, а также программируемых элементов привело к понятию РЭС.

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 ее в отдельный класс среди других конструкций:

1. Иерархической структурой, под которой подразумевается последовательное объединение более простых электронных узлов в более сложные.

2. Доминирующей ролью электрических и электромагнитных связей.

3. Наличием неоднородностей в электрических соединениях, приводящих к искажению и затуханию сигналов, а также паразитных связей, порождающих помехи (наводки).

4. Наличием тепловых связей, что требует принятия мер защиты, применения термочувствительных элементов.

5. Слабой связью внутренней структуры конструкции с ее внешним оформлением.

Теперь уточним понятие конструирования применительно к РЭС.

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.

Конструирование – это определение формы, материала, покрытий, способа соединений, состава (перечня составных частей). Конструирование и КД отвечают на вопрос «что должно быть сделано?» (как это выглядит, как должно функционировать, какие параметры иметь).

Технология – совокупность методов и средств изготовления готового изделия, отвечающего требованиям конструкторской и нормативно-технической документации (ТУ, ОСТ, ГОСТ). В отличие от конструирования технология отвечает на вопрос «как это должно быть сделано?», чтобы соответствовать КД.

Производственный процесс - совокупность всех действий людей и орудий производства, необходимых на данном предприятии для изготовления или ремонта выпускаемых изделий РЭС. В состав производственного процесса входят все действия по изготовлению, сборке, контролю качества выпускаемых изделий, перемещению, хранению его деталей, полуфабрикатов и сборочных единиц на всех стадиях изготовления; организация снабжения и обслуживания рабочих мест, участков, цехов, управление всеми звеньями производства, а также комплекс мероприятий и действий по технологической подготовке производства (изготовление, подготовка инструментов, стендов контроля, прогона, поддержание парка станков и технологического оборудования).

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 состоит из технологических операций. Структура технологического процесса более подробно изложена в главе 3.

РЭС являются подмножеством изделий машиностроения, а радиоэлектроника является подотраслью машиностроения. Поэтому стандарты (ЕСКД и ЕСТД) у них общие.

Технологический процесс является частью *производственного процесса*. Группа международных стандартов ISO выделяет три вида производственных процессов:

- основной (технологический) процесс;
- процессы обеспечения;
- процессы управления.

Примером, иллюстрирующим такое разделение, может быть лекция по дисциплине «Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности (ТОКТиН)». Основные процессы – чтение лекции, её обсуждение, конспектирование, ответы на вопросы. Вспомогательные процессы – обеспечение теплом, электроэнергией, оборудованием (оргтехника, мебель), уборка помещения. Процессы управления – составление учебным отделом и деканатом расписания занятий (день, время, аудитория), проверка посещаемости и качества проведения занятий.

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 трем 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 трех 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 – самолетную (вертолетную), ракетную и космическую.

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

- радиоэлектронное устройство;
- радиоэлектронный комплекс;
- радиоэлектронную систему.

При этом под *радиоэлектронным устройством* понимают функционально законченную сборочную единицу, выполненную на

несущей конструкции, реализующую функцию приема, передачи и преобразования информации [3, 11].

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°, %		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

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

Радиоэлектронная система представляет собой совокупность взаимодействующих радиоэлектронных комплексов и устройств, обладающую свойством изменять свою структуру и параметры с целью более эффективного выполнения поставленных задач.

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

- бытовая РЭС: радиовещательные приемники, тюнеры, телевизионные приемники; видеоманитофоны, диктофоны, комбинированные устройства;
- профессиональная РЭС: системы радиосвязи; контрольно-измерительная аппаратура;
- медицинская аппаратура;
- студийная звуко- и видеозаписывающая и воспроизводящая аппаратура;
- специализированная вычислительная техника для приема, 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 период эксплуатации (например, ракетная), многократного – 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 является основной, так как определяет объект установки, а значит и массу, форму, габариты, энергопотребление, стоимость, надёжность, защиту от дестабилизирующих факторов.

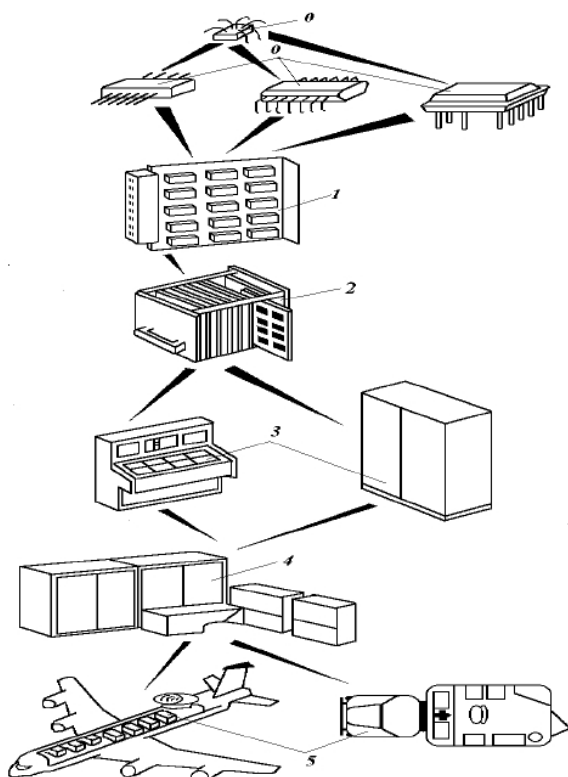


Рис. 1.2. Классификация РЭС по конструктивной сложности

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]:

- 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).

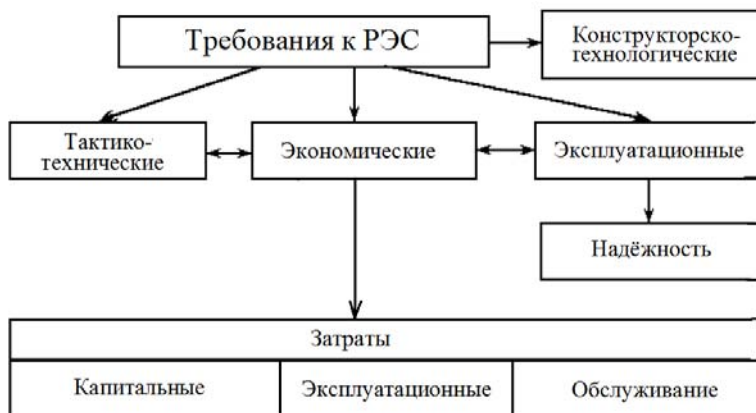


Рис. 1.3. Требования к конструкциям РЭС

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;
- обеспечение требуемой наработки на отказ;

- обеспечение среднего времени восстановления работоспособности;

- обеспечение долговечности и сохраняемости.

Для бытовой РЭС основным является показатель безотказности – средняя наработка на отказ T_{cp} . Значение этого показателя должно 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 надежность РЭС, облегчает обслуживание, улучшает ремонтпригодность.

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

Функционально-узловой метод заключается в том, что разрабатываемая конструкция расчленяется на функционально законченные узлы, которые могут быть отдельно сконструированы, изготовлены, настроены и испытаны до объединения их в общей конструкции. Это позволяет: свести к минимуму число внешних соединений, ввести параллельное проектирование составных частей изделия и за счёт этого значительно выиграть во времени разработки, организовать параллельное производство функциональных узлов, собирать РЭС из относительно небольшого числа крупных сборочных единиц.

Функционально-модульное конструирование является логическим продолжением функционально-узловой метода. Использование модулей позволяет вследствие единообразия и унификации конструкций дополнительно выиграть в плотности монтажа, подготовке производства, эксплуатации и техническом обслуживании. При модульном конструировании вся тяжесть разработки функционального узла перекладывается на специализированные предприятия, а проектирование систем сводится к проектированию на уровне структурной и компоновочной схем. Такой метод позволяет за счёт расширения фронта работ и специализации разработчиков существенно выиграть во времени и качестве разработки.

Функционально-блочный метод конструирования применяют при относительно несложной РЭС, где выигрыш от упрощения (удешевления) конструкции и увеличения надёжности за счёт уменьшения числа электрических соединений является решающим. Предельным случаем функционально-блочного метода является моноблочная конструкция прибора.

Для бытовой и авиационно-космической аппаратуры наиболее характерен функционально-блочный метод, реализуемый в виде моноблока на основе оригинальной конструкции. Для стационарной, подвижной и переносной аппаратуры специального назначения (вычислительная техника, радиолокация) основным является функционально-узловой метод.

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 вышестоящего уровня совместимы с конструкциями нижестоящего уровня.

На рис. 2.4 показаны размеры блоков и способы их установки на монтажных рамах авиационных РЭС.

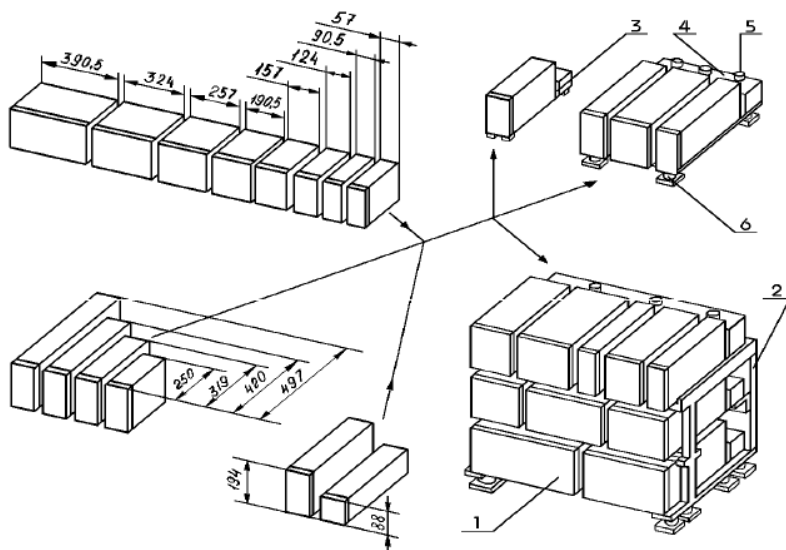


Рис. 1.4. Размеры и установка блоков авиационных РЭС

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. ГО. 410.224-84. Основной 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.

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

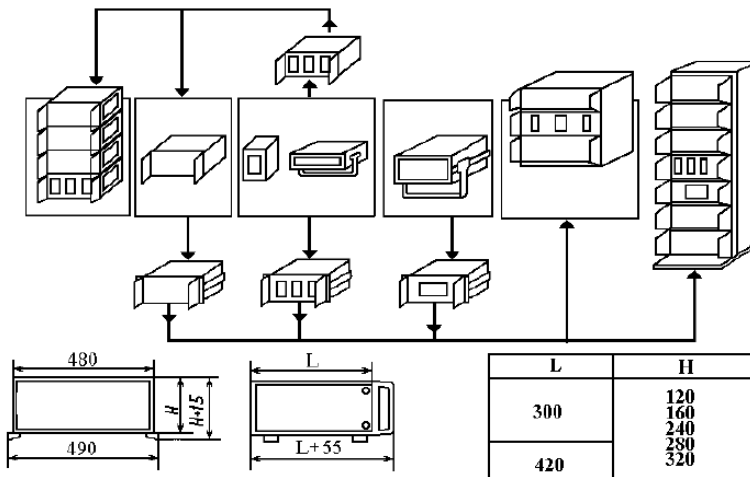


Рис. 1.5. Размеры и установка стационарных блоков РЭС

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 предназначена для автоматизации процесса проектирования и состоит из комплекса технических, программных и других 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.

Проверяется 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 данной стадии:

Разрабатываются электрические схемы с разбивкой на блоки и узлы.

Изготавливаются отдельные макеты для отработки электрических принципиальных схем.

Выбираются необходимые несущие конструкции.

Проводится моделирование (макетирование) 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:

1. Детальная и окончательная обработка схемных и конструкторских решений, включая создание чертежей на все важные узлы, блоки и приборы.

2. Заканчивается проработка всех вопросов защиты от внешних воздействий, доступа при ремонте и контроле, привязки к объекту установки, расположению органов управления.

3. Выполняются необходимые макеты, подвергаемые испытаниям.

4. 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 отчете 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 РЭС группируются по четырём 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°C 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).

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 отопляемых помещениях;
- в помещениях с повышенной влажностью.

В качестве *нормальных климатических условий* принимают: температуру окружающего воздуха $+15\dots+35^{\circ}\text{C}$, относительную влажность воздуха $45\dots75\%$, атмосферное давление $86\dots104$ кПа ($650\dots808$ мм ртутного столба).

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).

Повышенная температура приводит к пересыханию защитных покрытий с деформацией или растрескиванием; миграции примесей в полупроводниках; изменению электрических характеристик; деформации сопрягаемых деталей с различными коэффициентами температурных расширений.

Пониженная температура вызывает конденсацию влаги; изменение электрических характеристик; деформацию сопрягаемых деталей.

Термоудар вызывает механические повреждения в местах пайки, растрескивание покрытий.

Повышенная влажность приводит к снижению сопротивления изоляции между гальванически не связанными цепями, к электролизу, коррозии.

Пониженное давление приводит к снижению пробивного напряжения, ухудшению теплоотдачи.

Воздействие плесени, микроорганизмов, насекомых, грызунов может приводит к разложению и уничтожению элементов конструкции из органических материалов.

Воздействие механических и ряда климатических факторов (пыль, песок, тепловые удары) может привести к возникновению механических нарушений в конструкции.

Влияние невесомости сказывается в изменении свойств смазывающих масел (изменение трения), а также значений начальных напряжений в местах крепления блоков, обусловленных собственным весом блоков. При невесомости также нарушается конвекция и, следовательно, условия охлаждения РЭС.

Таблица 1.2. Эффект от воздействия внешних факторов среды на РЭС

Внешние факторы	Эффект воздействия	Отказы РЭС
Высокая температура	Пересыхание защитных покрытий с деформацией или растрескиванием, миграция примесей в полупроводниках, изменение электрических характеристик, деформация сопрягаемых деталей с различными коэффициентами температурных расширений, размягчение материалов, испарение жидких сред	Нарушение изоляции, механические повреждения, увеличение механических напряжений, 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, растрескивание, механическое повреждение, увеличивающийся износ подвижных частей, вызванный сжатием или потерей механической прочности или потерей смазки
Перепады температуры	Термоудар (механические повреждения в местах пайки, растрескивание покрытий)	Механическое повреждение, растрескивание, нарушение герметичности
Высокая влажность	Снижение сопротивления изоляции между гальванически не связанными цепями, электролиз, коррозия	Физические разрушения, нарушения изоляции, механическое повреждение
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)

Окончание табл. 1.2.

Низкое давление	Расширение, снижение электрической прочности воздуха, образование озона, ухудшение условий охлаждения	Механические повреждения (нарушение герметичности), искрение, перегрев
Песок, пыль	Абразивный износ и эрозия, термоизоляция, электростатические эффекты	Увеличенный износ, электрическое повреждение, механическое повреждение
Плесень, насекомые, грызуны	Разложение и уничтожение элементов конструкции из органических материалов	Нарушение изоляции, пробой, короткое замыкание
Радиация	Космическая радиация и облучение ядерными частицами приводят к возникновению процесса ионизации в материалах, что изменяет их свойства, нарушается структура полупроводниковых переходов, происходит снижение изоляционных свойств диэлектриков	Нарушение изоляции, пробой, короткое замыкание
Невесомость	Изменение свойств смазывающих масел (изменение трения), значений начальных напряжений в местах крепления блоков, обусловленных собственным весом блоков, нарушение конвекции	Нарушение условий охлаждения, внезапные отказы элементов

Радиационные факторы (космическая радиация и облучение ядерными частицами) приводят к возникновению процесса ионизации в материалах, что изменяет их свойства. Нарушается структура полупроводниковых переходов, снижаются изоляционные свойства диэлектриков.

Процесс разработки РЭС должен быть направлен на выбор таких ЭРЭ и материалов, схмотехнических и конструкторских решений, которые 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 элементы, конструктивные элементы, элементы монтажа и другие элементы [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 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 схмотехнических 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 схмотехнические 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 ди-

электрических 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;
- диэлектрические свойства.

Пластмассы (по сравнению с металлами) имеют также и ряд недостатков:

- меньшая прочность;
- большой 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.

Магниевые 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.

1.8. Конструкторские расчёты

Рассмотрим порядок некоторых расчётов, относящихся к конструкциям РЭС [4, 11].

Расчёт вибропрочности выводов элементов

При вибрационных нагрузках, действующих на РЭС, возможны разрушения выводов навесных элементов вследствие усталостных явлений. Установка навесных элементов на печатных платах зависит от их конструктивных особенностей. При двустороннем печатном монтаже ЭРЭ приподнимают над поверхностью платы, а при одностороннем монтаже корпус элемента прижимают к поверхности платы и закрепляют с помощью клеевого соединения. Механические напряжения в выводах элементов могут возникать по двум причинам.

Механическое напряжение возникает за счёт возникновения инерционных сил, действующих на установленный элемент, приподнятый на поверхность платы на высоту h (рис. 1.7).

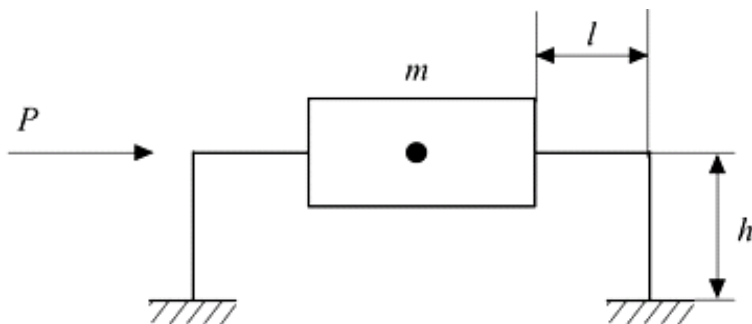


Рис. 1.7. Модель элемента над поверхностью печатной платы

Механическое напряжение возникает за счёт деформации печатной платы в условиях возникновения механического резонанса (рис. 1.8).

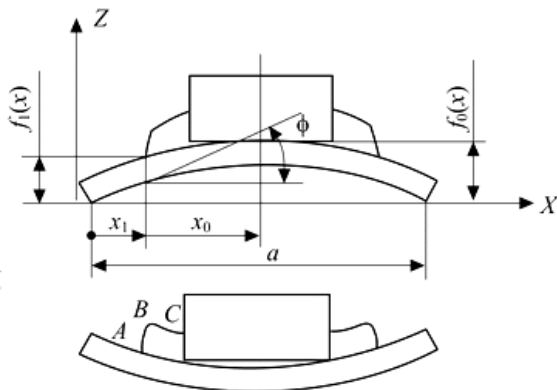


Рис. 1.8. Модель элемента, прижатого к печатной плате

Приведём основные расчётные соотношения для определения вибропрочности элементов, воспользовавшись моделью [4], представленной на рис. 1.9.

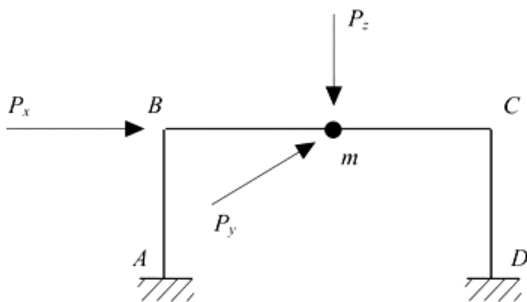


Рис. 1.9. Расчётная модель вибропрочности навесных элементов

Напряжения в точках определяются как:

$$\sigma_a = \sigma_d = \frac{M_a d}{2J}, \quad \sigma_b = \sigma_c = \frac{M_b d}{2J},$$

где M_a , M_b – изгибающие моменты в точках изгиба выводов, d – диаметр вывода, J – момент инерции сечения вывода элемента. При этом

$$J = \frac{\pi d^4}{64}.$$

Число циклов до разрушения определяется по графику на рис. 1.10.

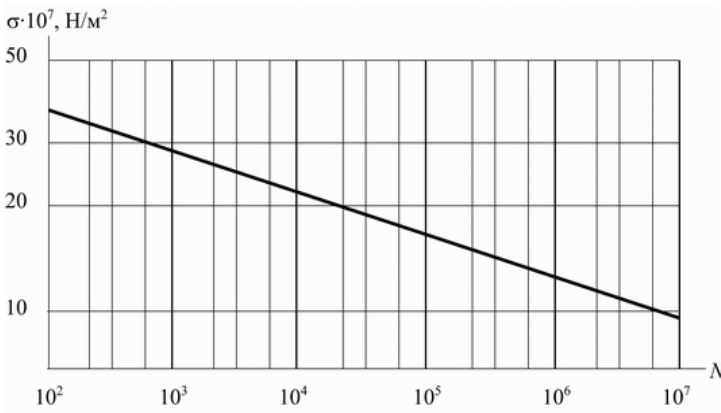


Рис. 1.10. Число циклов до разрушения материала

Время работы вывода ЭРЭ в условиях резонанса до разрушения:

$$t_p = \frac{N}{f_i},$$

где N – количество циклов, f_i – резонансная частота,

$$f_i = \frac{\pi^2}{\Omega^2},$$

где Ω – дикремент затухания, определяемый из соотношения $\Omega = 2\pi\beta_0$, причем β_0 – безразмерный параметр, для механических систем лежащий в диапазоне 0,02...0,025.

Расчёт эффективности экранирования

Расчёт эффективности экранирования некоторой области внутри РЭС зависит от характера электромагнитного поля. Известно, что вблизи источника излучения (при расстояниях менее 5λ , где λ – длина волны излучения) поле не сформировано и может преобладать либо магнитная, либо электрическая составляющая [4]. В этом случае расчёт экранирования сводится к определению ослабления либо электрической, либо магнитной составляющей поля. В дальней зоне (при расстояниях более 5λ) поле сформировано и задача экранирования решается относительно электромагнитного поля.

В общем случае ослабление поля, вносимого металлическим экраном, Дб, определяется из соотношения:

$$A_3 = 8,6 \ln[ch(K_M b)] + \ln[1 + 0,5(\frac{Z_c}{Z_3} + \frac{Z_3}{Z_c})th(K_M b)],$$

где K_M - коэффициент вихревых токов, Z_c - волновое сопротивление среды, Z_3 - волновое сопротивление экрана, b - толщина экрана.

Более подробно с расчётом параметров экранирования можно ознакомиться в литературе [4].

Требования к упаковочной таре для транспортирования РЭС.

Упаковочная тара должна гарантировать сохранность РЭС при её перевозке любыми транспортными средствами. Контейнер для перевозки изготавливают из недорогих материалов (металл, слоистое стекловолокно, дерево). Между жёсткой оболочкой тары и поверхностью РЭС прокладывают упругие амортизационные прокладки, гасящие вибрационные и ударные нагрузки при транспортировке (рис. 1.11)

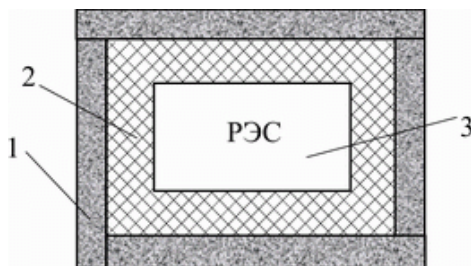


Рис. 1.11. Схема упаковочной тары:

1 – жёсткая оболочка, 2 – упругая прокладка, 3 – радиоэлектронное средство

Механические свойства упаковочных материалов характеризуются соотношением приложенной к поверхности материала нагрузки и деформации материала, вызываемой этой нагрузкой – статической жёсткостью. Амортизирующие прокладки могут быть упругими и неупругими. Первые полностью восстанавливают свою толщину после снятия приложенной нагрузки. В неупругих прокладках наблюдается остаточная деформация, поэтому они являются прокладками разового использования (табл. 1.3)

Таблица 1.3. Свойства материалов для упругих прокладок

Материал	Плотность ρ , г/см ³	Предельно допустимое давление σ_d , Н/см ²	Коэффициент демпфирования γ
Пенопласт полиуретановый (поролон)	0,03...0,07	0,8...1,0	0,10
Пенопласт полиуретановый с замкнутой структурой	0,35	20	0,08
Резина губчатая	0,127	3	0,12
Войлок мягкий	0,3	2...3	0,18...0,2
Сетка цельнометаллическая из проволоки ЭИ708 диаметром 0,09	1 1,87 2,68	20 30 140	0,3...0,4 0,3...0,4 0,3...0,4

Коэффициент демпфирования γ_m определяется по формуле

$$\gamma = \frac{h - h_d}{h},$$

где h – исходная толщина прокладки, h_d – толщина прокладки после деформации.

Толщина прокладки может быть приближённо вычислена из соотношения

$$h = \frac{mgH}{SE},$$

где m – масса РЭС, g – ускорение свободного падения, H – высота, на которой размещается РЭС при транспортировании, S – опорная поверхность РЭС, E – энергия, накопленная в единице объёма прокладки при минимальной упругой деформации.

На практике, в виду сложности установления параметра E , для определения требуемого материала и толщины прокладки применяют табличные данные и графики (рис.1.12).

На рисунке показаны графики для поролона (1) и губчатой резины (2). Параметр σ – это восстанавливающая сила после удара, которая вызовет в прокладке механическое напряжение, Θ – безразмерная величина, определяемая как E/σ . Чем меньше величина Θ , тем меньше может быть толщина упругой прокладки тары. Так,

например, из графика на рис. 1.12 следует, что в области высоких энергий удара преимущество имеет прокладка, выполненная из губчатой резины.

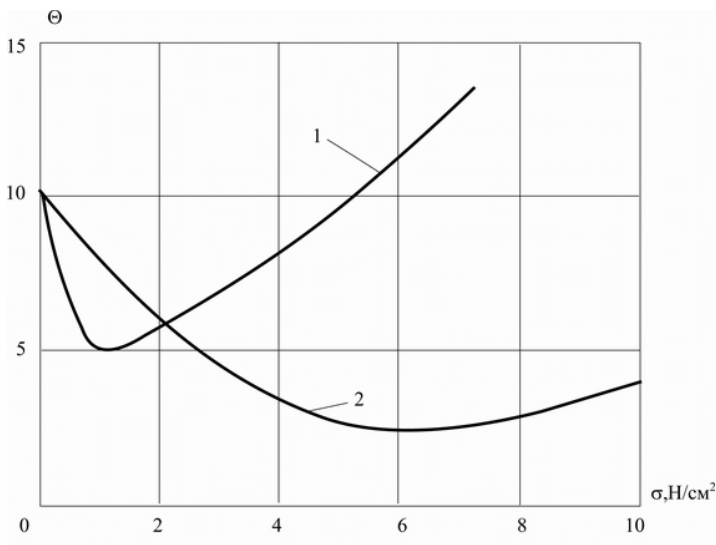


Рис. 1.12. Характеристики поролона и губчатой резины

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 надежность 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 конструкторской 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 объём 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 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 у цифровых РЭС.

Аналогично определяются коэффициент заполнения по массе K_m , а для печатных плат коэффициент заполнения по площади K_s . Это 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 опрессовкой. При пайке зазор между соединяемыми элементами за-

полняется расплавленным припоем без плавления основного материала элементов. Используемые припои – ПОС61, ПОС90 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.



Рис. 2.1. Методы монтажа

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. Трудоемкость сборочных и монтажных работ при производстве РЭС составляет 40...60% всей трудоемкости изготовления изделия.

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

Основные понятия и определения

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. приведены основные измеряемые параметры ПП согласно ГОСТ 23751- 86.

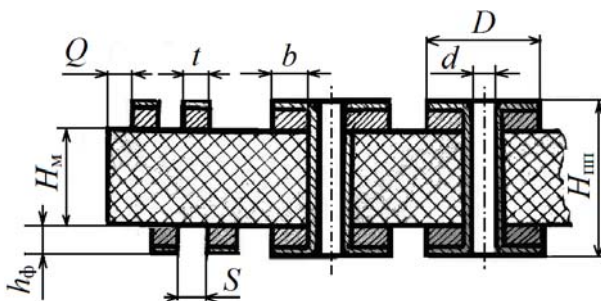


Рис. 2.2. Основные измеряемые параметры печатных плат

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_{ϕ} – 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].

Конструктивные характеристики печатных плат

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

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.

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

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.

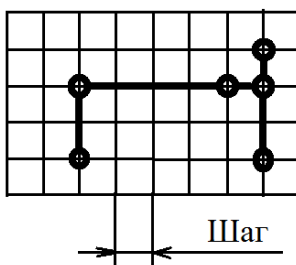


Рис. 2.3. Координатная сетка чертежа печатной платы

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. При использовании микросхем зарубежного производства с расстоянием между выводами, кратными 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 более 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.

Электрические характеристики печатных плат

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, расположенных 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

Материалы оснований печатных плат

В качестве материалов для оснований печатных плат используют:

- керамику;
- фольгированные и нефольгированные диэлектрики (гетинакс, текстолит, стеклотекстолит, стеклоткань, лавсан, фторопласт и др.)
- 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 текстильную (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 (деформации, прогибы и др.).

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
	СТФ-2-18	0,3; 0,35; 0,5; 0,8; 1; 1,5; 2; 2,5; 3

В стеклотекстолитах в качестве основы используют стеклоткань, пропитанную эпоксидной смолой. Этот материал более качественный, чем гетинакс, но более дорогой и труднообрабатываемый (увеличивает износ инструментов для его обработки). По сравнению с гетинаксами стеклотекстолиты имеют лучшие механические и электрические характеристики, более высокую нагревостойкость, меньшее влагопоглощение. Недостатки стеклотекстолитов – худшая механическая обрабатываемость, более высокая стоимость, существенное различие (примерно в 10 раз) коэффициента теплового расширения меди и стеклотекстолита в направлении толщины материала, что может привести к разрыву металлизации в отверстиях при пайке или в процессе эксплуатации.

Фольгированные диэлектрики – электроизоляционные основания, покрытые обычной медной фольгой с оксидированным

гальваностойким слоем, прилегающим к электроизоляционному основанию. Они могут быть односторонними и двусторонними.

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

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 выжигают их при температуре 600...700 °С.

Печатный монтаж и методы его получения

Печатный монтаж может быть реализован различными способами с применением различных материалов (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Способы получения проводников

Из субтрактивных методов наибольшее применение нашли химический и комбинированный позитивный. Первый используется для получения односторонних печатных плат, внутренних слоев многослойных печатных плат и гибких печатных шлейфов. Его достоинство – высокая точность геометрии проводников из-за отсутствия процессов гальванического осаждения меди.

Вторым методом получают двусторонние печатные платы, многослойные печатные платы из фольгированного травящегося диэлектрика. Способность диэлектрика к подтравливанию особенно

важна для МПП, где от этого зависит надёжность межслойных соединений. ДПП выполняются без использования травящего диэлектрика.

Рассмотрим последовательность основных операций изготовления ПП химическим негативным методом (рис. 2.5).

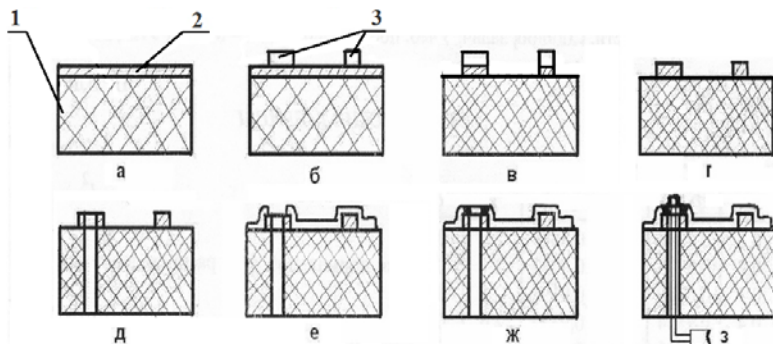


Рис. 2.5. Изготовления печатных плат химическим негативным методом:
1 – диэлектрическое основание печатной платы, 2 – медная фольга, 3 – фоторезист

Стадии технологического процесса в соответствии с буквенными обозначениями на рис. 2.5 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 устойчи-

вы к воздействию кислот и щёлочей, что даёт возможность защитить отдельные участки печатной платы, на которые наносились фоторезисты. Они также изменяют свои свойства под воздействием ультрафиолетового излучения.

В зависимости от протекания реакций фоторезисты бывают позитивные и негативные. При облучении негативного фоторезиста происходит потеря им растворимости. После обработки в растворителях на плате остаётся рисунок, негативный по отношению к фотошаблону.

Методы конструирования печатных плат

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.

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

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

Конструктивные покрытия

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 износоустойчивости
Палладий	1...1,5	Снижение переходного сопротивления, повышение износоустойчивости контактов переключателей
Никель	3...6	Защита от коррозии, повышение износоустойчивости контактов переключателей
Медь	25...30	Обеспечение электрических контактов соединений

Неметаллические конструктивные покрытия используются для защиты:

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

Используются такие диэлектрические покрытия, как эпоксидные смолы, эмали, оксидные плёнки.

Выбор и размещение отверстий

Количество типоразмеров отверстий печатной платы следует по возможности ограничивать. Рекомендуется 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).

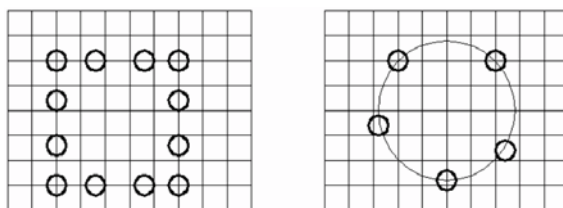


Рис. 2.6. Расположение отверстий на координатной сетке ПП

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.

Маркировка печатных плат

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

- обозначение печатной платы или её условный шифр;
- порядковый номер изменения чертежа, относящийся только к проводящему рисунку;
- буквенно-цифровые обозначения в слоях МПП.

Дополнительная маркировка наносится при необходимости и может содержать:

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

Основная маркировка выполняется способом, которым выполняется проводящий рисунок. Дополнительная маркировка обычно выполняется краской.

2.4. Межконтактные соединения из объёмного провода

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

Имеется следующая номенклатура объёмных проводов:

- одножильные без изоляции (золотые, алюминиевые, медные, медные лужёные);

- одножильные и многожильные без изоляции (волокнистой, пластмассовой, резиновой, лаковой);
- экранированные;
- коаксиальные кабели;
- многожильные кабели (опрессованные, тканые, клееные, собранные и увязанные в жгут).

Провода без изоляции используют в основном для электрических соединений ИС и микросборок. Золотая проволока хорошо поддаётся пайке и сварке, совместима практически со всеми материалами контактных площадок, прочная, но достаточно дорогая. Провода из алюминия и его сплавов более дешёвы, совместимы с алюминиевыми контактными площадками, но менее прочны в зоне контакта. Для золотых проводов используется в основном термокомпрессионная сварка, для алюминиевых – ультразвуковая.

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

В ряде случаев монтаж объёмными проводниками экономичнее, чем с помощью печатных плат (например, если плата большая и насыщенная элементами, а монтаж объёмным проводом выполняется автоматизированным методом). Электрические соединения объёмным проводом позволяют вносить изменения и облегчают контроль, но затрудняют воспроизводимость параметров электрических связей, в частности волнового сопротивления. Провода могут быть одножильные и многожильные. В первом случае контакт осуществляется накруткой (рис. 2.7), а во втором – пайкой.

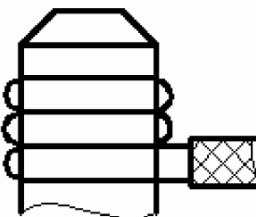


Рис. 2.7. Монтаж, осуществляемый накруткой

Для осуществления такого монтажа используют изолированные провода с медной посеребрённой жилой диаметром 0,16...0,5 мм.

При ручной работе производительность монтажа достигает 170..180 соединений в час, а при автоматизированной – до 1000 соединений в час.

Недостатком метода является большой объём контактного узла (4..6 витков на одном штыре), что также ухудшает частотные характеристики. Контактные штыри располагают с шагом 2,5 ... 1, 25 мм. Минимальные сечения штырей 0,3 на 0,3 мм.

При монтаже РЭС также широко используются плоские кабели. Они обладают высокой стабильностью электрических параметров, хорошим теплоотводом. Различают клееные, опрессованные и плетёные кабели.

3. ТЕХНОЛОГИЯ 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 приемов, 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.

Технологический процесс (ТП) – выполнение определённых действий, направленных на изменение исходных свойств объекта производства (в нашем случае РЭС) и достижения им определённого состояния, соответствующего технической документации. ТП является основной частью производственного процесса, который определяется совокупностью всех действий, необходимых на данном предприятии для изготовления, ремонта или технического обслуживания выпускаемых предприятием изделий.

Производственные процессы подразделяются на основные (технологический процесс), вспомогательные и управляющие. Вспомогательными процессами могут быть процессы энергообеспечения основного производства, изготовления специальной оснастки и др.

3.2. Виды и структура технологических 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.

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

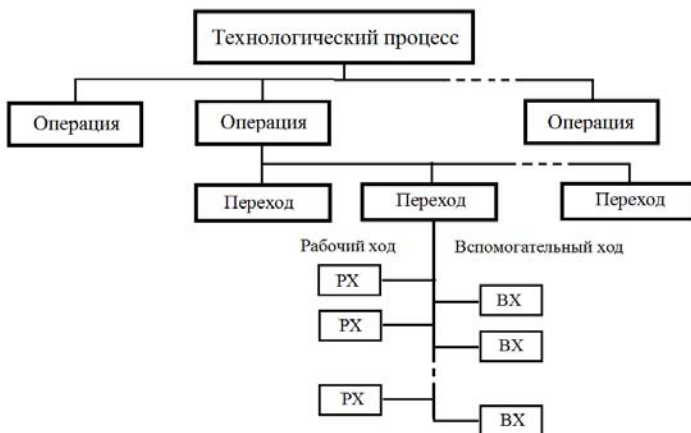


Рис. 3.1. Структура технологического процесса

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.

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, полученным 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. Является наиболее часто применяемым видом ТП в рамках данного классификационного признака.

3.3. 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 расчет 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. Расчет 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.

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

Номер продукта	Наименование операций	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/час
5	Сушка и поляризация клея	Шкаф- сушка

Окончание табл. 3.2.

6	Пайка выводов ИМС	ПНП- 5, 800...1000 эл./час
7	Пайка выводов конденсаторов	Квант- 500 250...400 шт/час
8	Визуальный контроль соединения	Монтажный стол
9	Промывка модулей	150 плат/час
10	Диагностический контроль и разборка	Аппаратура контроля
11	Лакирование модулей	Установка 50...100
12	Сушка модулей	Установка 50...60 модулей

3.4. 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. Показатели технологичности разрабатываемой продукции оценивают один или несколько признаков (свойств) конструкции, достигнутых при её разработке. Уровень технологичности определяет соотношение конкретного показателя с базовым. Допустимый для отрасли (предприятия) уровень технологичности конструкции устанавливается соответствующими стандартами.

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

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	$K_{а.м.} = \frac{N_{а.м.}}{N_m}$
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 применимости 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 таблице приняты обозначения:

$N_{имс}$ – количество интегральных микросхем в изделии;

$N_{эрэ}$ – количество электрорадиоэлементов в изделии;

$N_{а.м.}$ – количество автоматизированных и механизированных монтажных соединений;

N_m – общее количество монтажных соединений;

$N_{а.м.эрэ}$ – количество ЭРЭ, подготовленных к монтажу автоматизированным и механизированным способом;

$N_{а.к.н.}$ – 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.

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.

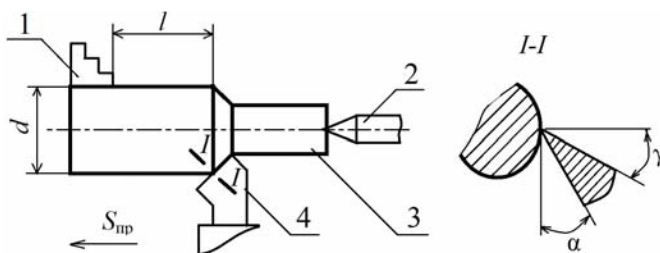


Рис. 4.2. Схема токарной обработки

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 углы – для обработки твёрдых и хрупких материалов заготовки.

Станки токарной группы бывают токарно-револьверные и одношпиндельные продольного точения. Первые служат для последовательной обработки закреплённой заготовки несколькими разными инструментами. Вторые предназначены для обработки калиброванных прутков диаметром от 3 до 25 мм с большим

отношением длины к диаметру. Шпинделем называется вращающаяся часть станка, к которой через оснастку крепится заготовка.

В последнее время токарные автоматы применяются не только в крупносерийном и массовом производстве, но и в серийном и мелкосерийном. Обработка деталей производится в автоматическом режиме по заранее заданной программе.

4.2. Обработка сверлением

Операции сверления применяют для получения отверстия в материале заготовке разного диаметра и качества поверхности (рис. 4.3).

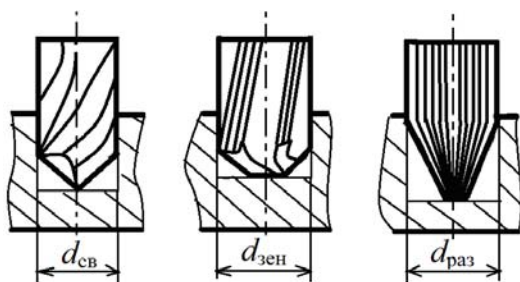


Рис. 4.3. Операции сверления

Собственно сверление обычно применяют для предварительной подготовки отверстия, используя режущий инструмент – сверло. Для повышения качества уже имеющегося отверстия применяют зенкерование. 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, клемные 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).

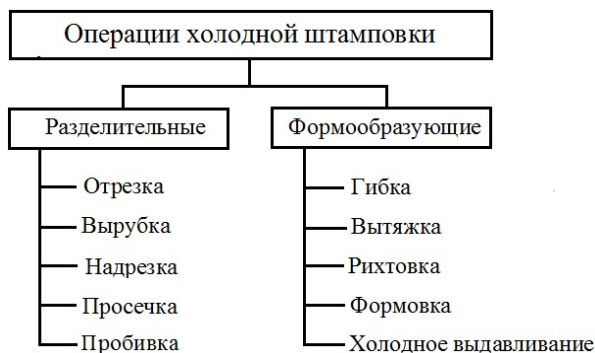


Рис. 4.4. Операции холодной штамповки

Рассмотрим некоторые из приведённых на рисунке способов 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 уг-

лом. Основную роль в процессе гибки играет технологическая пара пуансон – матрица (рис. 4.5).

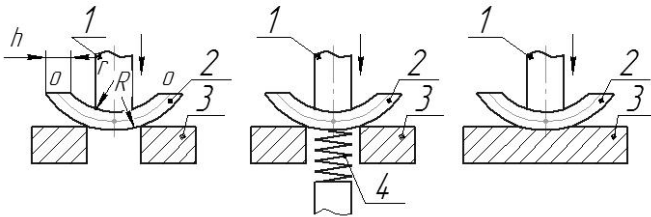


Рис. 4.5. Простая гибка, гибка с прижимом, гибка с калибратором

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.

Преимуществом схемы гибки с прижимом является то, что заготовка не смещается в процессе её обработки. В результате получается деталь более точной геометрической формы. 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).

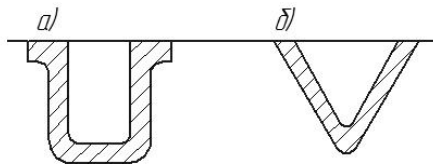


Рис. 4.6. Вытяжка колпачков деталей:
а – цилиндрической формы, б – конической формы

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.

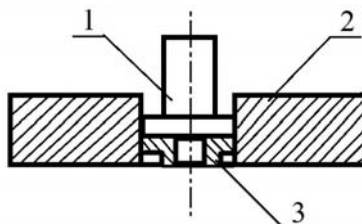


Рис. 4.7. Схема холодного выдавливания:
1 – пуансон, 2 – матрица, 3 – заготовка

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

Общие сведения об изготовлении 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 твердоупругое 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 отвердения материала изделия необходима выдержка. При выдержке сохранение высокого давления не нужно, поэтому выдержку изделия в пресс-форме осуществляют при меньшем давлении (10...30 МПа).

Величина давления на единицу площади проекции прессуемого изделия находится в зависимости от его конфигурации и размеров.

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 формирующей полости. Пресс-материал загружается в загрузочную камеру, где подвергается воздействию тепла и давления. Перейдя в полужидкое состояние, он проходит по специальным каналам-летникам в формирующую полость пресс-формы.

Процесс литьевого прессования состоит из следующих переходов:

- закрывания пресс-формы, установки на нее загрузочной камеры, заполнения пресс-материалом и нагрева материалов в закрытом состоянии под давлением;
- прессование изделия;
- подъем поршня загрузочной камеры и отделение ее от пресс-формы;
- разъем пресс-формы и удаление из нее готового изделия.

Литье под давлением. Этот способ применяется для изготовления деталей из термопластических пластмасс. Литье под давлением осуществляется на специальных литьевых машинах. Литьевые машины бывают 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 формирования и с помощью сжатого воздуха.

Пресс-формы для изготовления деталей.

Пресс-формы для изготовления деталей РЭА из пластмасс можно классифицировать по технологическим, эксплуатационным и конструктивным признакам.

По технологическому признаку пресс-формы делятся на три группы: прямые (компрессионные), литьевые и пресс-формы для литья под давлением.

Пресс-формы прямого прессования бывают открытые, закрытые и полузакрытые. Открытые пресс-формы имеют несложную конструкцию и предназначены для прессования деталей небольшой высоты простой формы из терморезистивных пластмасс. Они не имеют загрузочной камеры. Пресс-формы закрытого типа используют для изготовления деталей сложной конструкции. Они снабжены загрузочными камерами для пресс-материала, которые

являются продолжением рабочей полости и имеют одинаковые с ней очертания (рис. 4.8, 4.9).

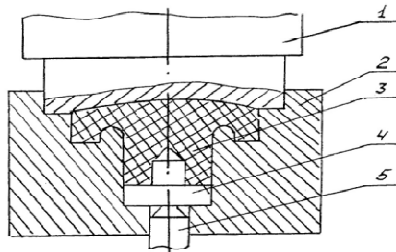


Рис. 4.8. Схема пресс-формы прямого прессования с горизонтальной плоскостью разъема: 1 – пуансон; 2 – матриц; 3 – деталь; 4 – знак; 5 – выталкиватель

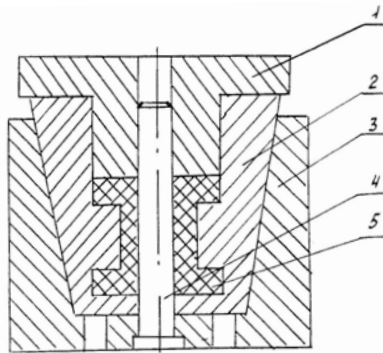


Рис. 4.9. Схема пресс-формы прямого прессования с двумя плоскостями разъема – вертикальной и горизонтальной:

1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – обойма; 4 – знак; 5 – деталь

Пресс-формы литейного прессования используют для изготовления деталей повышенной точности и сложной конфигурации. Они имеют загрузочную камеру, которая отделена от формирующей полости и расположена в нижней или верхней части пресс-формы. Загрузочная камера соединяется с формирующей полостью литниковой системой (рис. 4.10, 4.11).

Пресс-формы литья под давлением представляют разновидность пресс-формы литейного прессования. Такие пресс-формы устанавливаются на специальные литейные машины (термопласт-автоматы),

где нагревается пресс-материал и под давлением вводится в формирующую полость пресс-формы (рис. 4.12).

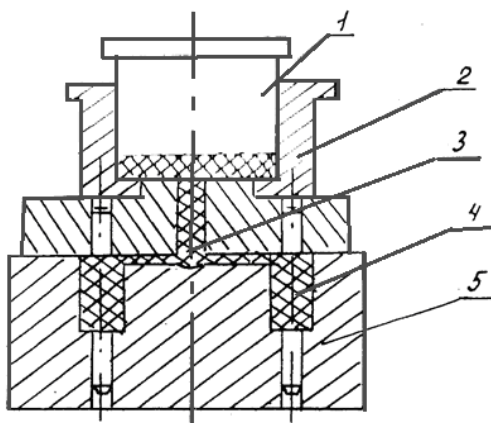


Рис. 4.10. Пресс-форма литейного прессования с горизонтальной плоскостью разъема, многогнездная: 1 – поршень; 2 – загрузочная камера; 3 – литниковая система; 4 – деталь; 5 – матрица

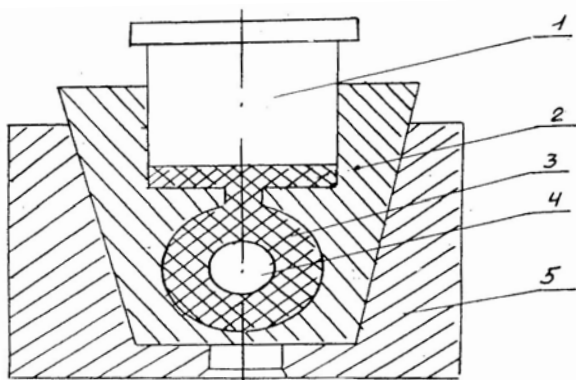


Рис. 4.11. Пресс-форма литейного прессования с вертикальной плоскостью разъема, одногнездная: 1 – поршень; 2 – матрица; 3 – деталь; 4 – знак; 5 – обойма

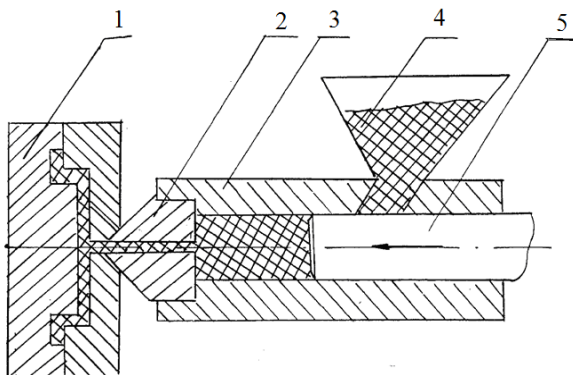


Рис. 4.12. Схема литьевой машины с поршневой подачей:
1 – пресс-форма; 2 – сопло; 3 – цилиндр; 4 – бункер; 5 – поршень

По эксплуатационному признаку пресс-формы делятся на съемные, которые периодически снимаются с прессы для извлечения изделий, полустационарные, в которых извлекается только матрица, и стационарные, закрепленные в прессе или машине.

По конструктивному признаку пресс-формы делятся на следующие: пресс-формы открытого и закрытого типа; одноразъемные (с одной плоскостью разъема) и с двумя (горизонтальной и вертикальной) плоскостями разъема; одногнездные и многогнездные.

Все детали, из которых состоит пресс-форма, можно разделить на две группы. Первая группа содержит детали технологического назначения, которые непосредственно соприкасаются с прессуемыми материалами и участвуют в той или иной степени в формообразовании изделий. Вторая группа – детали конструктивного назначения, которые осуществляют взаимную фиксацию деталей пресс-формы, обогрев, связь ее с прессом и обеспечивают монтаж.

Различают следующие детали технологического назначения:

а) рабочие детали, обеспечивающие получение изделия требуемой формы и размеров (матрица, пуансон);

б) детали литниковой системы и загрузки пресс-материала (загрузочные камеры, литниковые плиты, рассекатели);

в) детали выталкивания, установки и преобразования направления рабочего движения из вертикального в горизонтальное (клинья, гребешки, шибера).

Детали конструктивного назначения также разделяются на группы:

а) держащие и обогревающие детали (пуансонодержатели, обоймы, плиты обогрева);

б) опорные и направляющие детали, обеспечивающие правильное взаимное расположение и направление перемещения верхней части пресс-формы относительно нижней (направляющие колошей, втулки и т.д.);

в) крепежные детали, осуществляющие связь отдельных частей пресс-формы между собой (болты, разъемники, шпонки и т.д.).

Для изготовления деталей пресс-формы применяются следующие материалы:

- пуансоны и матрицы простой конфигурации изготавливаются из сталей 4Х13, У10А, УК13, 48А; матрицы и пуансоны сплошной конфигурации – из сталей 12ХИЗА, 38ХВ10А, 35Х10А;

- указанные детали подвергаются термообработке до твердости НРС 46...52;

- загрузочные камеры, втулки литниковые, платы литниковые, колонки и втулки направляющие, фиксаторы – из сталей У8А, У10А и подвергаются термообработке до НРС 46...50;

- остальные детали – из конструкционных сталей Ст3, Ст45, Ст6.

План технологического процесса изготовления деталей из пластмасс.

Технологический процесс прессования (литьевого и прямого) состоит из следующих операций: таблетирование, предварительный подогрев, прессование, удаление литниковой системы и облоя, термическая обработка.

Таблетирование – прессование таблеток из исходного материала (порошка, крошки и др.). Эта операция позволяет уменьшить объем загрузочной камеры и сократить время нагрева пресс-материала.

Таблетирование выполняется на высокопроизводительном технологическом оборудовании – автоматических и полуавтоматических таблеточных машинах.

Процесс таблетирования в основном происходит без подогрева исходного материала.

Предварительный подогрев. Эту операцию используют для сокращения нагрева пресс-материала в пресс-форме и снижения удельных давлений прессования и уменьшения износа пресс-форм.

Предварительный подогрев может производиться: в электротермостатах, токами высокой частоты и при помощи контактного подогрева (между двумя обогревательными плитами).

Прессование. Операция прессования включает в себя следующие переходы:

- дозировку – определение количества пресс-материала;
- сборку пресс-формы;
- загрузку пресс-материала;
- прессовку детали по установленному режиму;
- снятие давления;
- распрессовку пресс-формы и извлечение детали;
- очистку пресс-формы от облоя;
- контроль изготовленной детали.

Удаление облоя (грата) и литников. В зависимости от конструкции изделия эта операция выполняется на металлорежущих станках или слесарным инструментом.

Термическая обработка. Термическую обработку производят в целях снятия внутренних напряжений, возникающих в массе заготовки в процессе прессования. Она состоит из нагрева деталей в воздушной среде термостата или в масляной ванне до температуры 120...150 °С и выдержки при этой температуре в течение времени, устанавливаемого для каждого типоразмера детали опытным путем,

Технологический процесс литья под давлением осуществляется на литьевых машинах и состоит из следующих операций: литья, слесарной и контрольной.

Операция литья включает в себя следующие переходы: установку пресс-формы на литьевую машину; загрузку пресс-материала в бункер машины; наладку машины на заданный режим литья; подачу расплавленного материала в пресс-форму; отливку детали; охлаждение детали; открытие пресс-формы и удаление детали.

Слесарная операция применяется для удаления подтеков материала на плоскостях разъема и зачистки места среза литниковой системы.

Контрольная операция проводится для проверки внешнего вида изделия и соответствия его размеров чертежу.

4.5. Электрофизические и электрохимические методы изготовления деталей РЭС

Электрофизические и электрохимические методы обработки применяются 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, электрогидравлические, магнитоимпульсные, электрохимические, электроэрозионные и другие методы обработки деталей РЭС.

Ультразвуковой метод.

Суть метода в механическом воздействии на материал с частотой 18 000...20 000 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 резке (б) представлены на рис. 4.13.

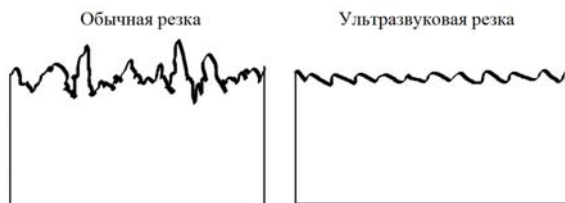


Рис. 4.13. Сравнение профилей обычной и ультразвуковой резки

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) создаётся 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. 4.14.

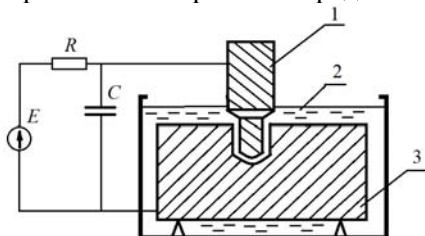


Рис. 4.14. Схема электроэрозионной обработки

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 эродийный участок прекращается после деионизации объема жидкости 2.

При увеличении ёмкости конденсатора увеличивается запас энергии, следовательно объем эрозийной лунки, повышается производительность техпроцесса. При увеличении величины сопротивления резистора увеличивается время зарядки конденсатора и длительность эрозийного цикла, что приводит к снижению производительности.

При снижении величины сопротивления резистора ниже определённого значения, эродийный процесс становится неуправляемым вследствие срыва релаксации и перехода в дуговой разряд. Электрическая эрозия происходит наиболее интенсивно, если межэлектродное пространство заполнено диэлектрической жидкостью – керосином, маслом, дистиллированной водой.

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.

Выбирают припой с учётом физико-химических свойств соединяемых металлов, требуемой механической прочности спая, его коррозионной устойчивости и стоимости.

Припой принято делить на две группы – мягкие и твёрдые. К мягким относятся припой с температурой плавления до 300⁰С, к твёрдым – выше 300⁰С. Припой также различаются по механической прочности. Мягкие припой 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. Широкое распространение в ра-

диоэлектронике получил припой ПОС-61. Проводимость этих припоев составляет 10...15% от проводимости чистой меди. Большое количество оловянно-свинцовых припоев содержит небольшой процент сурьмы. В последнее время более серьёзно учитывается токсичность компонентов припоя, поэтому всё чаще начинают использовать бессвинцовые припои.

В процессе пайки используются также флюсы. Флюс – вещество (чаще смесь) органического и неорганического происхождения, предназначенное для удаления окислов с поверхности детали, снижения поверхностного натяжения, улучшения растекания жидкого припоя и/или защиты от действия окружающей среды. Флюс может использоваться в виде жидкости, пасты или порошка. Существуют также паяльные пасты, содержащие частицы припоя вместе с флюсом или трубки из припоя, наполненные флюсом.

Для пайки чёрных металлов используются сильно-кислые (активные) флюсы на основе хлорида цинка и флюсы средней и малой активности на основе хлорида аммония (нашатырь).

Для алюминиевых сплавов лучшие результаты показывают многокомпонентные припои, содержащие цинк, кадмий, висмут. При этом применяется бинарный флюс на основе фосфорной кислоты.

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 перегонкой 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...120⁰С. 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 со-

стояние 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. 4.15 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.

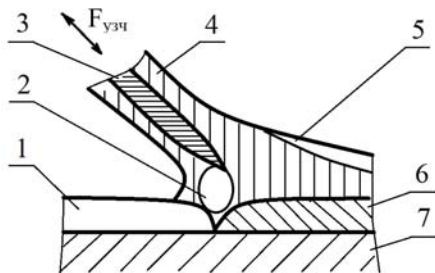


Рис. 4.15. Схема ультразвуковой пайки и лужения

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 $F_{узч}$ 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 плён-

ки, 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 зачищенные 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. 4.16.

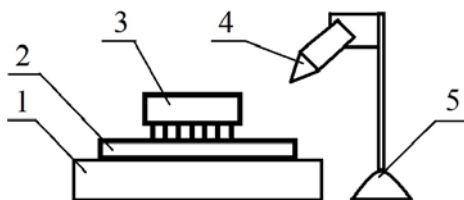


Рис. 4.16. Схема лазерной пайки

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.

Преимущества лазерной пайки заключаются в следующем:

- позволяет выполнять монтаж термочувствительных элементов;
- локальность приложения тепловых нагрузок снижает возникающие при пайке механические напряжения;
- 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 без образования перемычек и шариков припоя;
- возможность автоматизации всего технологического цикла 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. ДОКУМЕНТИРОВАНИЕ КОНСТРУКТОРСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК

5.1. Общие сведения о конструкторской и технологической документации

На всех этапах жизненного цикла РЭС сопровождает техническая документация. Состав этой документации и её содержание определяют международные, государственные и отраслевые стандарты. Имеется большое количество стандартов, сгруппированных в следующие комплексы:

ЕСКД – единая система конструкторской документации;

ЕСТД – единая система технологической документации;

ЕСПД – единая система программной документации;

ЕСТПП – единая система технологической подготовки производства;

ЕСЗКС – единая система защиты изделий и материалов от коррозии и старения.

Основная задача стандартизации – обеспечить единую нормативно-техническую, информационную, методическую и организационную основу проектирования, производства и эксплуатации изделий. При этом обеспечивается использование единой терминологии, взаимообмен документации между предприятиями без её переоформления, совершенствование организации проектных работ, возможность автоматизации разработки технической документации, унификация машинно-ориентированных форм документов, совершенствование форм учёта, хранения и изменения документации. Содержание стандартов в группе стандартов ЕСКД приводится в табл. 5.1.

Обозначение документов, входящих в ту или иную систему стандартов, подчиняется определённым правилам. Например, ГОСТ 2.701-84 означает: ГОСТ – категория нормативно-технического документа (государственный стандарт), 2 – класс стандарта ЕСКД, 7 – классификационная группа стандартов, 01 – порядковый номер стандарта в группе, 84 – год регистрации стандарта.

Таблица 5.1. Содержание стандартов в квалификационных группах ЕСКД

Шифр группы	Содержание стандартов в группе
0	Общие положения
1	Основные положения
2	Классификация и обозначение изделий в КД
3	Общие правила выполнения чертежей
4	Правила выполнения чертежей изделий машиностроения и приборостроения
5	Правила обращения КД (учет, хранение, внесение изменений)
6	Правила выполнения эксплуатационной и ремонтной документации
7	Правила выполнения схем
8	Правила выполнения документов строительных, судостроительных и горных дел
9	Прочие стандарты

5.2. Конструкторская документация

К конструкторским относятся графические и текстовые документы, которые определяют состав и устройство изделия и содержат необходимые данные для его разработки, изготовления, контроля, приёмки, эксплуатации и ремонта. Документы, в зависимости от стадии разработки, подразделяются на проектные и рабочие.

К проектным документам относятся техническое предложение, эскизный и технический проект.

На стадии рабочей документации выполняются следующие работы:

- разработка конструкторских документов для изготовления и испытания опытного образца;
- изготовление и испытание опытного образца;
- корректировка документов по результатам испытаний;
- приёмочные испытания опытного образца;
- корректировка конструкторской документации по результатам приёмочных испытаний опытного образца;
- изготовление и испытание установочной серии;

- корректировка конструкторской документации по результатам приёмочных испытаний установочной серии.

Откорректированная в таком порядке документация используется для организации серийного производства изделий. Документам технического предложения присваивается литера «П», эскизного образца «Э», технического проекта «Т», рабочей документации опытного образца «О», серийного (массового) производства «А» или «Б».

Схемная документация.

Схема – это графический конструкторский документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними. Такие документы входят в комплект конструкторской документации и содержат вместе с другими документами необходимые данные для проектирования, изготовления, сборки, настройки и эксплуатации изделий.

В зависимости от составляющих элементов и связей между ними схемы подразделяются на виды, обозначаемые:

- Э – электрические;
- Г – гидравлические;
- К – кинематические;
- Л – оптические;
- П – пневматические.

По основному назначению схемы подразделяют на типы, обозначаемые цифрами:

- 1 – структурная;
- 2 – функциональная;
- 3 – принципиальная;
- 4 – схема соединений;
- 5 – подключения;
- 6 – общие;
- 7 – расположения;
- 8 – прочие;
- 0 – объединенные.

Наименование схемы определяется её видом и типом, например, Э3 – схема электрическая принципиальная. Схемы выполняются без соблюдения масштаба, действительное пространственное расположение составных частей не учитывается или учитывается приближённо.

Текстовые документы.

К текстовым документам относится расчётно-пояснительная записка. В этом документе излагаются сведения о результатах выполненной работы по проектированию изделия с приложением (при необходимости) графических документов. Пояснительная записка выполняется на листах формата А4. Она в общем случае должна содержать разделы:

1. Введение, с указанием на основе каких документов разработан проект.
2. Назначение и область применения проектируемого изделия.
3. Требуемая техническая характеристика изделия.
4. Описание и обоснование выбранной конструкции.
5. Расчёты, подтверждающие работоспособность и надёжность конструкции.
6. Описание технологического процесса изготовления изделия.
7. Ожидаемые технико-экономические показатели.
8. Вопросы экологии и безопасности труда при изготовлении и эксплуатации изделия.

Общие требования к текстовым документам регламентируются ГОСТ 2.205 – 95. Формы и правила их выполнения – ГОСТ 2.106 – 68. Отдельные разделы расчётно-пояснительной записки, например список использованных литературных источников, регламентируется соответствующими стандартами.

Конструкторские документы.

Конструкторские документы бывают текстовые и графические. Номенклатура основных конструкторских документов, оформляемых на разных стадиях проектирования, представлена в табл. 5.2.

Таблица 5.2. Перечень документов, оформляемых на различных стадиях разработки

Наименование документа	Шифр	Техническое предложение	Эскизный проект	Технический проект	Рабочая документация
Чертёж детали				*	1
Сборочный чертёж					1
Чертёж общего вида		*	*	1	
Габаритный чертёж		*	*	*	*

Окончание табл. 5.2

Монтажный чертёж					*
Схемы		*	*	*	*
Спецификация					1
Ведомость покупных изделий			*	*	*
Пояснительная записка		1	1	1	
Технические условия					*
Программа и методика испытаний			*	*	*
Таблицы		*	*	*	*
Расчёты		*	*	*	*
Патентный формуляр		*	*	*	*

Примечание: 1 – обязательный документ, * – на усмотрение заказчика.

Как видно из табл. 5.2, основными документами на стадии рабочей документации являются сборочный чертёж, чертежи деталей и спецификация. На каждую деталь и сборочную единицу выполняют отдельный рабочий чертёж с основной надписью. Рабочий чертёж должен содержать все сведения для изготовления изделия:

- графические изображения, полностью отражающие форму детали или сборочной единицы;
- необходимые размеры с предельными отклонениями;
- указания о шероховатости поверхности;
- технические требования, содержащие данные, которые невозможно представить графически.

Текстовые технологические требования записывают, если они являются единственными гарантиями качества изделия, например, технологию пайки, склеивания, совместную обработку деталей.

Технические требования.

Эти данные располагаются над основной надписью. На листах формата более А4 допускается размещение текста в две и более колонки. Пункты технических требований и технической характеристики должны иметь самостоятельную нумерацию. Общая ширина колонки должна быть не более 185 мм.

Технические требования на чертеже излагают, группируя однородные и близкие по своему характеру требования по возможности в следующей последовательности:

1. Требования к материалу, заготовке, термической обработке и к свойствам материала готовой детали (например, твёрдость), указание материалов-заменителей.

2. Размеры (формовочные и штамповочные уклоны, радиусы), предельные отклонения размеров, не указанные на чертеже.

3. Требования к качеству поверхностей.

4. Зазоры, расположения отдельных элементов конструкции.

5. Требования к настройке изделия.

6. Другие требования к качеству изделия, например, бесшумность, виброустойчивость и др.

7. Условия и методика испытаний.

8. Указания и маркировка.

9. Правила транспортирования и хранения.

10. Особые условия эксплуатации.

На поле чертежа могут размещаться и таблицы. Их размещают на свободном поле чертежа справа или снизу изделия. Содержанием таблиц могут быть данные, например, о числе витков и диаметре провода обмоток трансформатора, характеристики оптоэлектронных элементов и др.

Сборочные чертежи.

Сборочный чертёж должен содержать:

- изображение сборочной единицы, позволяющее осуществить её сборку и контроль;

- размеры, предельные отклонения и другие параметры, которые должны быть выполнены или проконтролированы по сборочному чертежу;

- указания о выполнении разъёмных соединений, если точность сопряжения достигается пригонкой или подбором, и указания о методах и характере сопряжения;

- номера позиций составных частей, входящих в изделие;

- габаритные, установочные, присоединительные и другие необходимые справочные размеры.

Как правило, сборочные чертежи выполняются с упрощениями, например, допускается выполнять изображение только одной их одинаковых частей, а остальные давать упрощённо, в виде внешних

очертаний. На разрезах обычно изображают нерассечёнными части, на которые оформлены самостоятельные сборочные чертежи.

Типовые, покупные и другие широко применяемые изделия и элементы изображают внешними очертаниями. На сборочных чертежах допускается не показывать:

- фаски, проточки, углубления, выступы и другие мелкие элементы;

- зазоры между валами и отверстиями;

- крышки, щиты, кожухи, перегородки и т.д.; если необходимо показать закрытые или составные части изделия, на чертеже делают соответствующую надпись, например «крышка не показана»;

- надписи на табличках, шкалах и других подобных деталях, изображая только их контур.

Составным частям изделия присваивают номера позиций и указывают их в спецификации. На сборочном чертеже номера позиций указывают на изображениях составных частей, видимых на основных видах и заменяющих их разрезах. На выносных полках номера позиций располагают параллельно основной надписи чертежа вне контура изображения и группируют их в колонку или строчку по возможности на одной линии. Проставляют их, как правило, один раз. Иногда допускается указывать повторно номера позиций одинаковых составных частей. Шрифт номеров позиций должен быть на 1 – 2 номера больше, чем размер шрифта для размерных чисел на том же чертеже.

Допускается делать общую линию-выноску с вертикальным расположением номеров позиций: для группы крепёжных деталей (винт, болт, гайка, шайба), относящихся к одному и тому же месту крепления, и для группы деталей с отчётливо выраженной зависимостью. На сборочных чертежах указывают следующие размеры:

- габаритные – длина, ширина, высота;

- монтажные – размеры, определяющие взаимное расположение составных частей (деталей) сборочной единицы;

- установочные – размеры, определяющие присоединение изделий к другим изделиям;

- эксплуатационные – диаметры проходных отверстий и т.д.

Данные размеры относятся к справочным, на чертежах их обозначают звёздочкой «*».

Спецификации.

Спецификация – документ, определяющий состав изделия и всей конструкторской документации, относящейся к этому изделию. Её составляют и оформляют на отдельных листах формата А4 на каждую сборочную единицу, комплекс и комплект.

В зависимости от состава изделия спецификация может состоять из разделов, которые располагаются сверху вниз в следующей последовательности:

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

Наименования разделов записываются в виде заголовков в графе «Наименование» строчными буквами (кроме первой прописной) и подчёркивают. Ниже и выше заголовка – одна свободная строка [].

Пример оформления спецификации приведён в табл. 5.3.

Таблица 5.3. Пример спецификации на РЭС

Поз.	Обозначение	Наименование	Кол-во	Примечание
		<u>Документация</u>		
	ИПФС.677111.008 СБ	Сборочный чертёж		
		<u>Сборочные единицы</u>		
	ИПФС.684145.060	Катушка	1	
		<u>Детали</u>		
	ИПФС.721642.134	Втулка	1	

	ИПФС.725648.117	Крышка	1	
	ИПФС.727454.101	Ползун	1	
	ИПФС.727541.124	Упор	1	
1	ИПФС.728488.304	Корпус	1	
3	ИПФС.801421.117	Пружина	1	
		<u>Стандартные изделия</u>		
6		Винт М2х6.01.016 ГОСТ 14703 - 74	4	
7		Винт М3х10.01.016 ГОСТ 14703 - 74	2	
2		Шайба 3.651 ГОСТ 6402 - 70	2	

5.3. Технологические документы

Состав технологической документации и её содержание определяют международные, государственные и отраслевые стандарты, в первую очередь Единая система технологической документации (ЕСТД). Единицей стандарта является технологический документ (ТД).

Технологический документ – текстовый или графический документ, в отдельности или в совокупности с другими документами определяет порядок проведения технологических процессов. ГОСТ 3.1001 – 81 определяет назначение комплекта стандартов ЕСТД:

- установление единых унифицированных форм документов, обеспечивающих совместимость информации независимо от применяемых методов их проектирования;

- создание единой информационной базы для внедрения средств механизации и автоматизации при проектировании ТД и решении инженерных задач;

- установление единых требований и правил по оформлению документов;

- обеспечение оптимальных условий при передаче ТД на другое предприятие с минимальным переоформлением;

- создание предпосылок по снижению трудоёмкости инженерно-технических работ;

- обеспечение взаимосвязи с системами общетехнических и организационно-методических стандартов.

Обозначение документов, входящих в систему стандартов, подчиняется определённым правилам. Например, ГОСТ 3.1505- 75 означает: ГОСТ – категория нормативно-технического документа (государственный стандарт), 3 – класс стандарта ЕСТД, 1 – подкласс стандарта (машиностроение, приборостроение), 5 – классификационная группа стандартов (основное производство. Формы документов и правила их оформления на испытания и контроль), порядковый номер стандарта в группе, 75 – год регистрации стандарта.

Содержание стандартов в группе стандартов ЕСТД приводится в таблице 5.4.

Таблица 5.4. Содержание стандартов в квалификационных группах ЕСТД

Шифр группы	Содержание стандартов в группе
0	Общие положения
1	Общие требования к документам
2	Классификация и обозначение ТД

Окончание таблицы 5.4.

3	Общие требования к документам на машинных носителях
4	Основное производство. Формы документов по видам работ
5	Основное производство. Формы документов и правила их оформления на испытания и контроль
6	Вспомогательное производство. Формы технологических документов
7	Правила заполнения технологических документов
8	Резервная группа
9	Информационная база

Классификация и примеры технологических документов.

Технологические документы классифицируются по различным признакам.

По назначению ТД делятся на основные, вспомогательные и производственные. Основные ТД используют на рабочих местах. Вспомогательные ТД разрабатывают с целью оптимизации проведения работ. Производственные ТД предназначены для нормирования трудозатрат, выдачи и сдачи материалов и комплектующих.

По виду носителя информации ТД делятся на документы на бумажном носителе и документы на электронном носителе.

По виду информации ТД бывают текстовые, графические и мультимедийные.

По видам документов ТД делятся в соответствии с ГОСТ 3.1102 – 81.

Приведем некоторые примеры технологических документов.

Ведомость материалов – сводные поддетальные нормы расхода материалов на изделие. При этом драгоценные металлы учитываются отдельно.

Ведомость сборки изделия – порядок сборки с учётом очередности входящих частей и их количества. Иногда выполняется ещё схема сборки, ключевым элементом в которой является базовая деталь.

Технологическая ведомость – указания по группированию деталей и сборочных единиц по технологическим признакам.

Технологическая инструкция – описание приёмов работы, действий, типовых техпроцессов.

Маршрутная карта – сводные данные по составу применяемых операций, оборудованию, ТД и по трудозатратам на выполнение техпроцесса.

Операционная карта – описание единичных технологических операций.

Журнал контроля техпроцесса – данные для контроля параметров техпроцесса на соответствующем оборудовании.

Ведомость технологических документов – полный состав ТД, применяемых на данном производстве.

6. НАДЁЖНОСТЬ РЭС

6.1. 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 надежность 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 надежности*.

Основные термины определения надежности техники установлены ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения». Надежность – 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.

Надежность 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).

Ремонтпригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и

ремонта. Термин «ремонтпригодность» 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. 6.1.

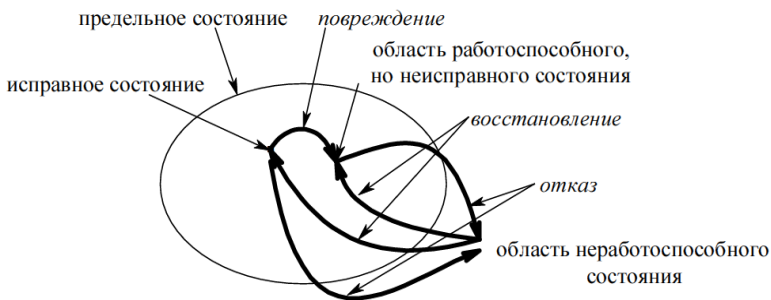


Рис.6.1. Диаграмма состояний изделия (объекта)

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 расчетных методов и средств контрольно-измерительной техники, позволяющих своевременно обнаруживать источники возможных отказов и прогнозировать их развитие во времени, все 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. С точки зрения теории вероятностей – это случайное событие.

6.2. 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. Типичный график функции $P(t)$ приведен на рис. 6.2.

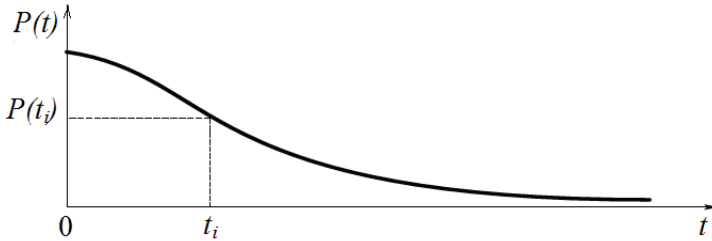


Рис. 6.2. Типичный вид функции безотказной работы РЭС

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 $N_0 \rightarrow \infty$ функции 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 $P(t_0)$, $P(t)$ – вероятности безотказной 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. 6.1 в качестве примера приведены параметры надёжности некоторых резисторов.

Таблица 6.1. 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

График зависимости интенсивности отказов серийных РЭС от времени представлен на рис. 6.3.

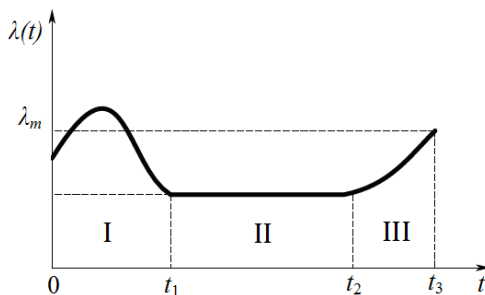


Рис. 6.3. Типичный вид функции интенсивности отказов РЭС

Он 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 прирабочные отказы, физической 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. 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 электрорадиоэлементы. 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. 6.3).

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 среднеарифметическое 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_i – число исправных изделий, поставленных на испытание.

6.3. Способы повышения надёжности РЭС

В последнее время проблема надёжности РЭС заметно обострилась [33]. 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; в этом случае отказ РЭС без контроля со стороны оператора может привести к серьёзным экономическим и техногенным последствиям.

Чтобы определить способы повышения надёжности РЭС, вначале рассмотрим основные причины их отказов.

Основными причинами отказов РЭС являются следующие:

- нарушение работоспособности электрорадиоэлементов и отказы элементов конструкции;
- ошибки при схемотехническом, конструкторском и технологическом проектировании;
- нарушение условий эксплуатации.

Для повышения надёжности применяется ряд способов, наиболее действенным из которых является резервирование (рис. 6.4).

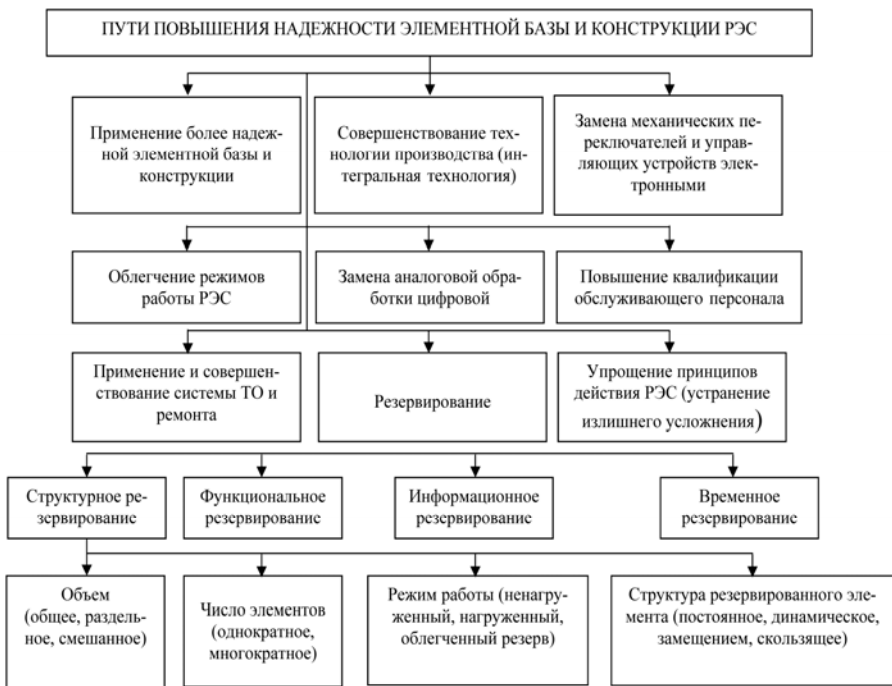


Рис. 6.4. Пути повышения надёжности РЭС

Различают пять видов резервирования:

- структурное – предусматривающее использование избыточных структурных элементов;
- 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. 6.2.

Таблица 6.2. 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
	Облегченный резерв
	Ненагруженный резерв
Кратность резервирования	Однократное резервирование
	Многократное резервирование

Для оценки надёжности РЭС применяются два метода (рис. 6.5).

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.)

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 не пригоден 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 контак-

та, 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.

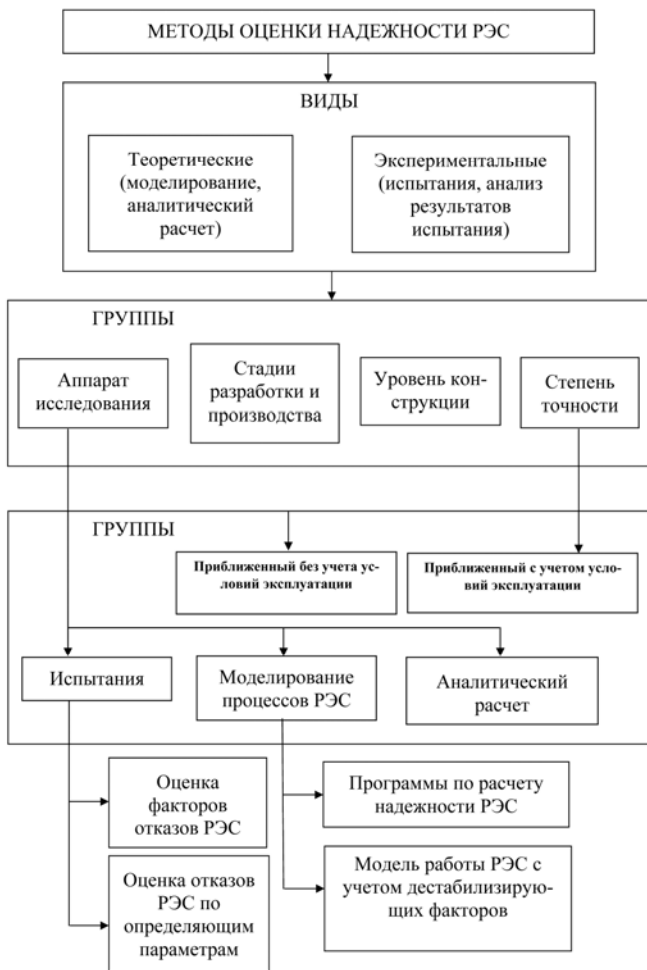


Рис. 6.5. Методы оценки надёжности РЭС

Классификация конструкторских методов обеспечения надёжности РЭС представлена на рис. 6.6.



Рис. 6.6. Конструкторские методы обеспечения надёжности РЭС

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

- ЭРИ 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.

6.4. Автоматизированный расчёт надёжности РЭС в программной среде «Искра»

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
- $$\lambda(t) = \lambda = const ;$$
- 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

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

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 наиме-

нования 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. Ошибочно введённый 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.

Продемонстрируем принцип работы программы «Искра» на конкретном примере.

На рис. 6.7 представлена принципиальная схема усилителя низкой частоты (УНЧ). Необходимо рассчитать параметры надёжности УНЧ.

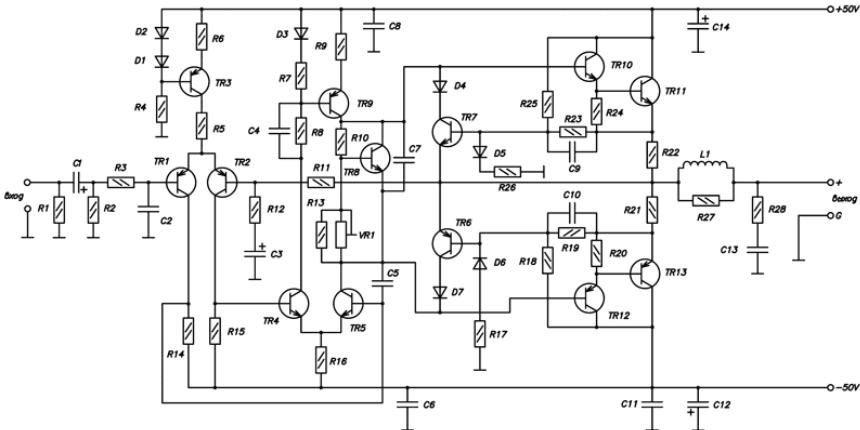


Рис. 6.7. Принципиальная схема усилителя низкой частоты

К схеме прилагается перечень всех элементов, на основании которого, пользуясь справочной информацией, находим интенсивности отказов элементов, объединяя их в группы. Количество паяных соединений определяем по табл. 6.3.

Таблица 6.3. Определение количества соединений пайкой в схеме

Порядковый номер группы	Обозначение элемента	Количество контактов	Количество в схеме	Количество соединений пайкой
1	Резистор	2	29	58
2	Диод	2	7	14
3	Конденсатор	2	14	28
4	Транзистор	3	13	39
5	Катушка	2	1	2
ИТОГО			64	141

После внесения данных в программу получаем результаты, отображённые на рис. 6.8.

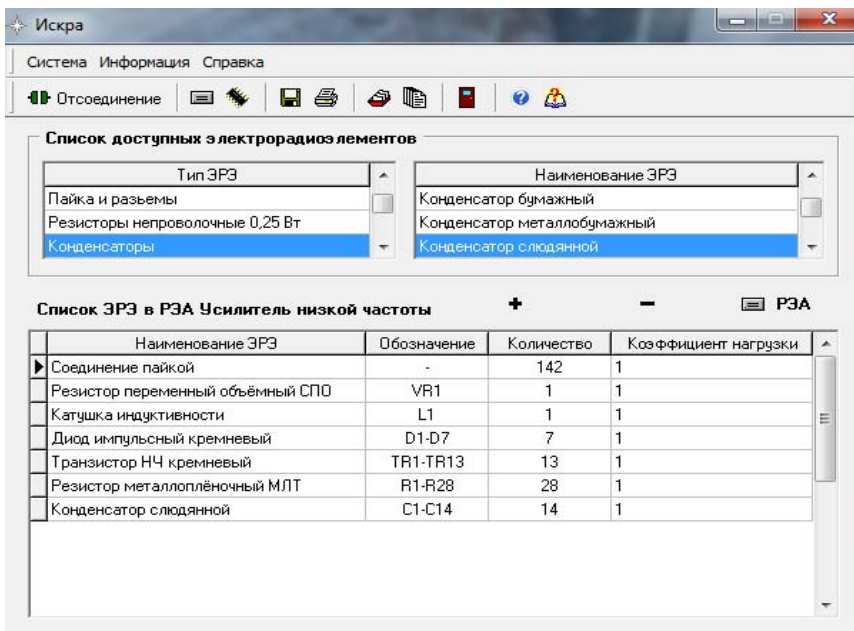


Рис. 6.8. Снимок экрана с результатами заполнения базы данных

Исходя из назначения устройства, выбираем время эксплуатации – 18250 часов, условия эксплуатации – лабораторные (температура 20 – 40°C, 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. 6.9).

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

В случае невыполнения данного условия принимаются меры по повышению надёжности устройства.

Таковыми мерами могут быть изменение теплового режима устройства (введение принудительного охлаждения), применение экранирования для защиты от электромагнитного излучения, стабилизации частоты с помощью кварцевых элементов и т.д. В рамках программы доступна только замена данных ЭРЭ на более надёжные, с меньшей интенсивностью отказов. Если при повторном расчёте

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

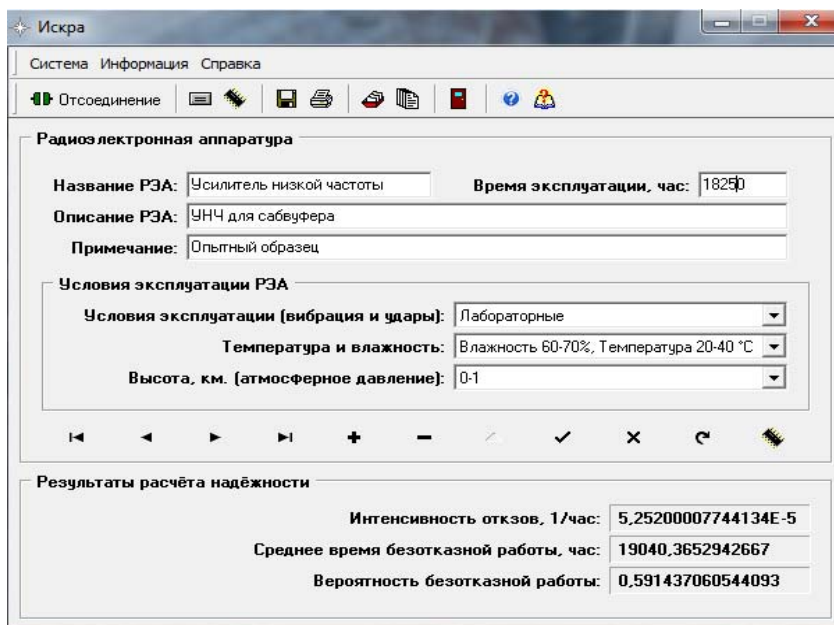


Рис. 6.9. Результаты расчета надёжности в программе «Искра»

Авторы выражают благодарность канд. техн. наук М.А. Санникову за проделанную работу по написанию программы.

7. КАЧЕСТВО РЭС

Качество – совокупность свойств изделия, удовлетворяющих требованиям заказчика, корпоративным, отраслевым, государственным или мировым стандартам [32].

Наиболее важные показатели качества применительно к РЭС [14]:

- функциональность;
- точность;
- надёжность;
- технологичность;
- эргономичность;
- экологичность;
- патентно-правовая чистота.

Следствием повышения качества чаще всего является повышение цены изделия, что отражено на рис. 7.1.

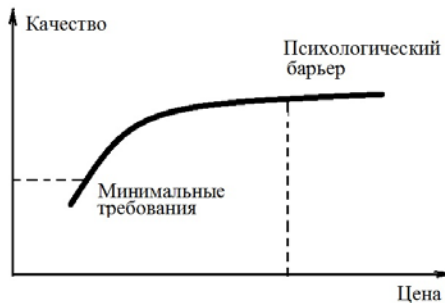


Рис.7.1. Соотношение цены и качества изделия

Наряду с минимальными требованиями потребителя к качеству изделия существует также психологический барьер, если цена выше представляется покупателю явно завышенной. Положения точек минимальных требований и психологического барьера на кривой зависит от состояния развития прогресса, характера изделия, особенностей конкурентной среды, предпочтений и привычек потребителей и других факторов.

Рассмотрим практические аспекты определения качества РЭС – оценка качества конструкции РЭС, точность геометрических размеров и качество поверхности деталей РЭС.

7.1. Оценка качества конструкции РЭС

Оценить качество конструкции РЭС – это значит сравнить её с другой, аналогичной конструкцией. Вновь разрабатываемая конструкция обычно сравнивается с лучшим аналогом из всех существующих. В этом случае этот аналог называют прототипом. Качеством конструкции называется совокупность свойств конструкции, обуславливающая её способность удовлетворять определённые потребности в соответствии с назначением.

При оценке качества конструкции используют показатели качества – количественные характеристики одного или нескольких свойств. Уровень качества конструкции определяется в четыре этапа: выбор показателей качества; выбор базового изделия из числа аналогов; заполнение карты (таблицы) технического уровня изделия; вычисление уровня качества конструкции. Из всех показателей качества выбираются наиболее существенные. Рекомендуется выбирать простые показатели, потому что сложные показатели в значительной мере являются субъективными.

Оценка уровня качества в существенной степени зависит от правильности выбора аналога. При этом аналогом называют реально существующую конструкцию отечественной или зарубежной разработки одного класса, обладающую сходностью назначения (ГОСТ 2.116 – 71). Базовым изделием называется лучшее изделие из числа аналогов, показатели которого оптимальны на данный момент времени, а техническая реализуемость подтверждается его практическим применением. В некоторых случаях не удаётся отыскать удовлетворительных аналогов изделия. В этом случае за базовые показатели принимаются заданные и технически реализуемые параметры. Пример показателей приведён в табл. 7.1.

Для оценки итогового показателя качества применяют формулу:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n v_i K_i}{\sum_{i=1}^n v_i} .$$

При этом весовые коэффициенты всех рассматриваемых показателей отвечают условию: $0 < v_i < 1$.

Таблица 7.1. Сравнение показателей базового и проектируемого изделия

Показатели	Количественные значения показателей					
	Базовый показатель	Проектируемый показатель	Нормированный показатель	Весовой коэффициент	Базовый показатель с учётом весового коэффициента	Проектируемый показатель с учётом весового коэффициента
Выходная мощность, мВт ¹	30	50	1,67	1,0	1,00	1,67
Коэффициент усиления ¹	12	15	1,25	0,9	0,9	1,13
Потребляемая мощность, мВт ²	100	90	1,1	0,5	0,5	0,55
Габариты, мм ²	150x140x280	150x140x300	0,93	0,3	0,3	0,28
Масса, кг ²	2,5	3,0	0,83	0,2	0,2	0,17
Итоговый показатель					2,9	3,8

¹ - показатели, увеличение которых является положительным фактором проектирования;

² – показатели, увеличение которых является отрицательным фактором проектирования.

Из сравнения базовой и проектируемой конструкции (табл. 7.1) видно, что по первым трём показателям проектируемое изделие превосходит базовое, а по последним двум – уступает ему. В данном случае всё определяют весовые коэффициенты, показывающие насколько важным является тот или иной показатель. С учётом весовых коэффициентов преимущество имеет проектируемое изделие.

7.2. Точность параметров деталей РЭС

Точность – степень соответствия действительного параметра номинальному. Степень соответствия характеризуется допуском. Допуск может быть плюсовой, минусовой и равносторонний. В ра-

диоэлектронике чаще всего приходится сталкиваться со следующими группами параметров:

- геометрические (линейные размеры, форма и др.);
- физические (напряжение, сила тока, сопротивление, ёмкость, индуктивность и др.);
- химические (растворимость, концентрация, скорость диффузии др.).

Допуск на физические параметры даётся, как правило, в процентах.

Для определения точности линейных размеров используется единая система допусков и посадок (ЕСДП), опирающаяся на международную систему стандартов ИСО. В ЕСДП приняты 19 квалитетов точности, которым должны удовлетворять размеры деталей исходя из их назначения (табл. 7.2).

Таблица 7.2. Использование квалитетов точности

Номер квалитета	Применение
01, 0, 1	Концевые меры длины
2, 3, 4	Калибровка и особо точные изделия
5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	Сопрягаемые размеры деталей
14, 15, 16, 17	Несопрягаемые размеры деталей

Допуски и посадки установлены для четырёх диапазонов номинальных размеров: малый – до 1 мм, средний – от 1 до 500 мм, большой – от 500 до 3150 мм, очень большой – от 3150 до 10 000 мм. Средний диапазон является наиболее важным.

В табл. 7.3 приведены значения допусков в интервале размеров от 1 до 500 мм.

При обработке деталей неизбежно возникают погрешности геометрических размеров. Погрешности можно классифицировать на систематические постоянные, систематические закономерные и случайные.

Систематические постоянные погрешности – являются постоянной величиной, не изменяющейся при изготовлении партии деталей.

Таблица 7.3. Значения допусков квалитетов

Интервал размеров, мм	Допуски квалитетов									
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1-3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14
3-6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18
6-10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22
10-18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27
18-30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	12	21	33
30-50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39
50-80	0,8	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54
80-120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54
120-180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63
180-250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72
250-315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81
315-400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89
400-500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97

Интервал размеров, мм	Допуски квалитетов									
	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
1-3	25	40	60	100	140	250	430	600	1000	
3-6	30	48	75	120	180	300	480	750	1200	
6-10	36	58	90	150	220	360	580	900	1500	
10-18	43	70	110	180	270	430	700	1100	1800	
18-30	52	84	130	210	330	520	840	1300	2100	
30-50	62	100	160	250	390	620	1000	1600	2500	
50-80	87	140	220	350	540	870	1400	2200	3500	
80-120	87	160	250	400	630	1000	1600	2500	4000	
120-180	100	160	250	400	630	1000	1600	2500	4000	
180-250	115	185	290	460	720	1150	1850	2900	4600	
250-315	130	210	320	520	810	1300	2100	3200	5200	
315-400	140	230	360	570	890	1400	2300	3600	5700	
400-500	155	250	400	630	970	1550	2500	4000	6300	

Систематические закономерные погрешности – являются изменяющейся во времени составляющей погрешности.

Случайные погрешности – зависят от многих не связанных между собой факторов.

Например, при токарной обработке постоянные систематические погрешности возникают при неправильной установке режущего инструмента. Систематические закономерные погрешности возникают при изменении температуры окружающей среды или износе режущего инструмента.

Случайные погрешности возникают при колебаниях припуска на обработку заготовки, колебаниях размеров заготовок, варьировании твёрдости материала, вследствие упругих деформаций системы станок-инструмент-заготовка-приспособление. Характер распределения случайных погрешностей определяется на основе кривых распределения.

Кривую можно построить экспериментально на основе гистограммы распределения (рис. 7.2). Гистограмма строится в следующем порядке:

1. Определяется диапазон рассеивания размеров детали x_{\min} , x_{\max} .
2. Выбирается интервал распределения Δx . При выборе слишком малого интервала распределение будет слишком дифференцированным. При выборе большого значения интервала, наоборот, распределение сглаживается. В обоих случаях трудно уловить тенденцию и сделать какие-либо выводы о технологическом процессе. Поэтому следует выбирать оптимальные значения интервала.
3. Строится гистограмма, на которой отмечается количество попаданий в тот или иной интервал. Чем больше число попаданий, тем выше прямоугольник, откладываемый на гистограмме.

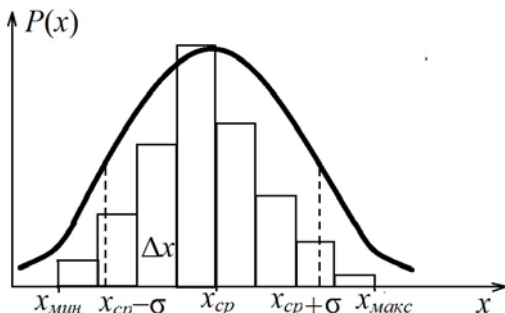


Рис. 7.2. Гистограмма распределения и её аппроксимация

После построения гистограммы её можно аппроксимировать непрерывной кривой, соответствующей определённому закону распределения вероятностей. Наибольшее теоретическое и практическое значение имеет нормальный закон распределения, называемый также законом Гаусса. Он получается в случае, если результирующая погрешность является суммой частных погрешно-

стей, в процессе измерения число факторов, влияющих на погрешности, не меняется, факторы взаимно независимы, т.е. действие одного фактора не приводит к возникновению (усилению, ослаблению) другого, среди всех действующих факторов нет доминирующих.

Аналитически нормальный закон распределения описывается выражением:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(x_i - x_{cp})^2}{2\sigma^2},$$

где $P(x)$ – плотность вероятности распределения случайной величины; x_{cp} – среднее арифметическое значение измеренных параметров; x_i – текущее значение параметра; σ – среднее квадратическое отклонение параметра.

Закон распределения Гаусса обладает следующими свойствами:

1. Симметричность относительно среднего значения x_{cp} .
2. Максимум распределения достигается в точке примерно $0,4/\sigma$.
3. Координаты точек перегиба кривой равны примерно $0,24/\sigma$.
4. Площадь под кривой распределения на отрезке от -3σ до 3σ составляет 99,73 % всей площади. Именно это значение интервала – 3σ , 3σ принимается за допуск.

7.3. Качество поверхности деталей РЭС

Качество поверхности является важнейшей эксплуатационной характеристикой деталей РЭС. Основной характеристикой качества поверхности является шероховатость – совокупность микронеровностей поверхности без учёта её волнистости.

Шероховатость возникает главным образом вследствие пластической деформации поверхностного слоя заготовки при её обработке. Причиной шероховатости являются неровности режущей кромки инструмента, трения, вырывания частиц материала с поверхности заготовки, вибрации заготовки и инструмента и другие. Требования к шероховатости устанавливаются исходя из функционального назначения поверхности деталей и их конструктивных особенностей.

Многократно увеличенный профиль поверхности детали представлен на рис. 7.3.

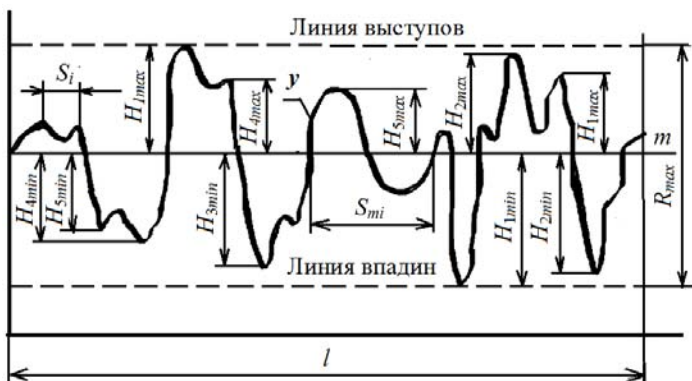


Рис. 7.3. Профиль поверхности детали

На рис. 7.3 введены обозначения: y – профиль поверхности детали, R_{max} – наибольшая высота неровностей, H_i – высота неровностей от средней линии, l – базовая длина детали, S_m – средний шаг неровностей, S – средний шаг неровностей по вершинам.

Количественно шероховатость оценивается по нескольким показателям.

Среднее арифметическое отклонение профиля определяется по формуле:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l y dt .$$

На практике вместо интеграла используются дискретные отрезки профиля, определяемые по уровню фотоэлектрическим методом. Чем меньше величина отрезка, тем более точно определяется показатель R_a :

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i .$$

Следующим показателем является высота неровностей по десяти точкам:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 H_{\max} - \sum_{i=1}^5 H_{\min} \right) ,$$

где H_i – расстояние до соответствующих точек профиля от средней линии m .

Максимальная высота неровностей определяется разностью между линией выступов и линией впадин:

$$R_{\max} = H_{1\max} - H_{1\min} .$$

Средний шаг неровностей определяется по формуле:

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi} .$$

Средний шаг неровностей по вершинам определяется выражением:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i .$$

В табл. 7.4 приводятся значения показателей для установленных 14 классов шероховатости поверхности. Классы с 1 по 3 обеспечивают обдирочной обработкой – точением, фрезерованием, строганием. Применяют в том случае, когда требования к качеству поверхности невысоки.

Таблица 7.4. Классы шероховатости поверхности

Классы	Разряды	Параметры шероховатости, мкм		Базовая длина, l, мм
		R_a	R_z	
1			320 - 160	8
2			160 - 80	
3			80 - 40	
4			40 - 20	
5			20 - 10	
6	а	2,5 – 2,0		2,5
	б	2,0 – 1,6		
	в	1,6 – 1,25		
7	а	1,25 – 1,0		0,8
	б	1,0 – 0,80		
	в	0,80 – 0,63		
8	а	0,63 – 0,50		
	б	0,50 – 0,40		
	в	0,40 – 0,32		
9	а	0,32 – 0,25		
	б	0,25 – 0,20		
	в	0,20 – 0,16		
10	а	0,160 – 0,125		
	б	0,125 – 0,100		
	в	0,100 – 0,080		

11	а	0,080 – 0,063		0,25
	б	0,063 – 0,050		
	в	0,050 – 0,040		
12	а	0,040 – 0,032		
	б	0,032 – 0,025		
	в	0,025 – 0,020		
13	а		0,100 – 0,080	0,08
	б		0,080 – 0,063	
	в		0,063 – 0,050	
14	а		0,050 – 0,040	
	б		0,040 – 0,032	
	в		0,032 – 0,025	

Классы с 4 по 6 получают полуструевой обработкой с применением более точных инструментальных средств и более совершенных технологических процессов.

Классы с 7 по 9 требуют чистовой обработки – шлифованием, тонким точением, протягиванием, развёртыванием, хонингованием.

Качество поверхности классов 10 – 14 получают доводочной обработкой – притиркой, суперфинишем, хонингованием.

Классы шероховатостей с 6 по 14 делятся на разряды а, б, в. В классах 1 – 5, 13, 14 не применяют параметр R_a , а в классах 6 – 12 не применяют параметр R_z .

Начальная шероховатость, которую получают сразу после изготовления деталей РЭС, изменяется в процессе приработки.

Получаемая после приработки (при трении качения, трении скольжения и др.) шероховатость, обеспечивающая минимальный износ, сохраняется в процессе длительной эксплуатации изделия и называется оптимальной шероховатостью. Параметры оптимальной шероховатости зависят от конструкции и материала трущихся деталей, качества смазки и других условий работы.

Численное значение параметра шероховатости указывают в обозначении: для параметра R_a – без буквенного обозначения, например 0,25. Для всех остальных параметров после буквенного обозначения, например R_{\max} 5,8 или R_z 64. Схема условного обозначения шероховатости на чертежах деталей представлена на рис. 7.4.



Рис. 7.4. Схема условного обозначения шероховатостей

Вид обработки, базовая длина и направление шероховатостей указываются в том случае, когда это необходимо. Обычно указывается заключительный вид обработки, например полировать. Для различной обработки применяются разные знаки шероховатостей. На рис. 7.5 показаны случаи: а – деталь получена со снятием слоя материала; б – деталь получена без снятия слоя материала, например литьём; в – способ обработки не установлен.



Рис. 7.5. Знак шероховатости с учётом способа обработки материала

Направление неровностей определяется по ГОСТ 2789 – 73. Различают параллельное, перпендикулярное, перекрещивающееся, кругообразное, радиальное и произвольное направления. Чаще всего направление неровностей не указывают или применяют произвольное направление, обозначаемое буквой М (рис. 7.6).

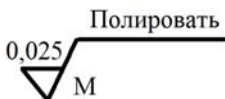


Рис. 7.6. Пример условного обозначения шероховатости

Обозначение на рисунке означает, что шероховатость поверхности оценивается средним арифметическим отклонением профиля R_a , равным 0,025 мкм, обработка произведена путём снятия слоя материала (например точением), направление неровностей – произвольное, окончательным способом обработки является полирование, базовая длина конструктором не установлена.

8. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

8.1. Цели и задачи планирования эксперимента

Эксперимент всегда служил средством познания окружающего мира, критерием истинности гипотез и теорий. Долгое время считалось, что выбор стратегии эксперимента и его реализация полностью определяются опытом и интуицией исследователя. Однако рост объемов экспериментальных исследований сделал актуальной постановку вопроса об эффективности эксперимента. Возникли математическая теория эксперимента и планирование эксперимента как её часть [8, 19].

Планирование эксперимента – это оптимальное управление экспериментом при неполном знании механизма явлений [21]. Это общее определение, которое впоследствии будет уточняться.

Методы планирования экспериментов используются при исследовании различных объектов (не только объектов радиоэлектроники). Объекты отличаются прежде всего процессами, которые в них протекают. Процессы, в свою очередь, характеризуются переменными, между которыми существуют определенные причинно-следственные связи (рис. 8.1).

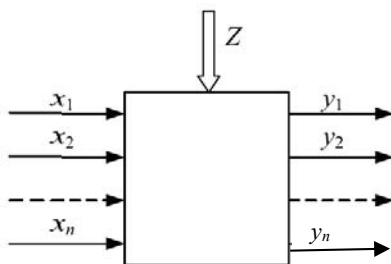


Рис. 8.1. Информационная структура объекта исследования

Переменные, играющие роль причин, являются входными (x_1, x_2, \dots, x_n). Переменные, отражающие последствия причин – выходными (y_1, y_2, \dots, y_n).

Входные управляемые переменные в теории планирования эксперимента называются *факторами*. Неконтролируемые и

неуправляемые переменные обозначены Z , которая считается случайной величиной, имеющей определенный закон распределения.

Планы эксперимента составляются исходя из заданных целей исследования, которых может быть множество. Разнообразие целей порождает многообразие планов эксперимента.

Выходные переменные называют *критериями оптимизации* или *целевыми функциями*. Целью экспериментальных исследований является построение математической модели объекта исследования. Под математической моделью понимается уравнение, связывающее целевую функцию с факторами. В общем виде это уравнение можно записать:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Временными изменениями переменных в рамках данной модели пренебрегают, считая их неизменными, а переход с одного уровня переменной на другой происходит мгновенно, т.е. рассматриваются статические модели объектов.

Каждый фактор может принимать одно или несколько значений, называемых уровнями. Фиксированный набор уровней факторов определяет одно из возможных состояний объекта. Если перебрать все возможные наборы состояний, получим полное множество различных состояний данного объекта. Число различных состояний определяет сложность исследуемого объекта и определяется по формуле:

$$N = k^n,$$

где k – число уровней факторов, n – число факторов.

Формула справедлива, если число уровней любого из факторов одинаково.

Простой технический объект, например РЭС, с двумя факторами и пятью уровнями факторов имеет, таким образом, 25 состояний. Исследование его (построение математической модели) не вызывает трудностей и может быть сделано простым перебором всех состояний.

Но если, например, мы имеем 10 факторов с четырьмя уровнями, получается 10 048 576 возможных состояний объекта. Полнофакторный эксперимент с таким количеством состояний затруднен. В этом случае целесообразно применять статистические методы планирования эксперимента. Таким образом, можно уточнить

определение планирования эксперимента, данное нами вначале этого параграфа.

Планирование эксперимента – методика выбора условий проведения опытов и выбора количества опытов, необходимого для построения модели объекта исследования.

8.2. Параметры оптимизации и факторное пространство

При планировании эксперимента важно определить параметр, который мы будем оптимизировать (целевую функцию). Критерий оптимизации, заданный количественно, называется *параметром оптимизации*.

В зависимости от целей исследования параметры оптимизации могут быть разные (рис. 8.2).



Рис.8.2. Классификация параметров оптимизации

Параметр оптимизации должен быть эффективным с точки зрения достижения цели, количественным, статистически эффективным, иметь физический смысл, просто и легко вычисляться, существовать во всех возможных состояниях [29].

Из многих параметров, характеризующих объект исследования, выбирается один, который и служит параметром оптимизации. Остальные параметры в этом случае рассматриваются как ограничения.

Входные управляемые переменные x_1, x_2, \dots, x_n , как уже отмечалось, называются факторами. При выборе факторов следует руководствоваться следующими условиями:

- фактор должен быть количественно регулируемым (требование управляемости);
- точность изменения факторов должна быть известна и достаточно высока (требование однозначности);
- факторы должны иметь области определения, заданные технологическими или методическими ограничениями;
- между факторами и параметрами оптимизации должно существовать однозначное соответствие.

В методах планирования эксперимента используется представление целевой функции (*функции отклика*) в виде степенного ряда:

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{\substack{j,u=1 \\ j \neq u}}^k \beta_{ju} x_j x_u + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \dots,$$

где $\beta_0, \beta_j, \beta_{ju}$ и т.д. – постоянные коэффициенты.

Самыми распространёнными являются полиномы первого и второго порядка.

Сущность факторного эксперимента первого порядка состоит в одновременном варьировании всех факторов и представлении математической модели (функции отклика) в виде линейного полинома:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n,$$

А также исследовании данного полинома методами математической статистики.

Для лучшего понимания изложенного рассмотрим простой пример.

Производительность оборудования Y зависит от температуры x_1 и давления x_2 . Температура изменяется от 60 до 80 градусов по Цельсию, давление от 1000 до 1500 кПа. Задача: выяснить в процессе эксперимента характер зависимости производительности оборудования от температуры и давления.

Задача сводится к определению коэффициентов линейного уравнения регрессии:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2.$$

Схема проведения эксперимента представлена на рис. 8.3.

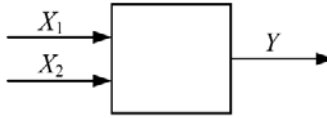


Рис. 8.3. Схема проведения двухфакторного эксперимента

Уровнем фактора называют определенные значения факторов, которые будут фиксироваться в эксперименте. Средние значения факторов называют нулевыми уровнями. В нашем случае $x_{10} = 70$, $x_{20} = 1250$. Интервал варьирования факторов Δx – это такое значение фактора, прибавление которого к среднему уровню даёт верхний, а вычитание – нижний уровень фактора.

Экстремальные значения, которые могут принимать факторы, не меняя своих свойств и не искажая сути исследуемого процесса, назовём областью варьирования факторов, а интервал $x_{j\max}$, $x_{j\min}$ – областью определения фактора. Область варьирования факторов M составляет часть области определения факторов L (рис. 8.4).

Эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания факторов, называется полнофакторным экспериментом (ПФЭ). Если каждый фактор варьируется только на двух уровнях, число опытов определяется:

$$N = 2^2 = 4.$$

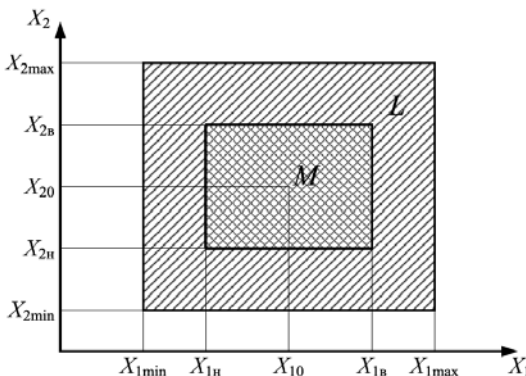


Рис. 8.4. Факторное пространство исследуемого объекта

Каждая точка факторного пространства 1, 2, 3, 4 – это номер опыта в эксперименте (рис. 8.5).

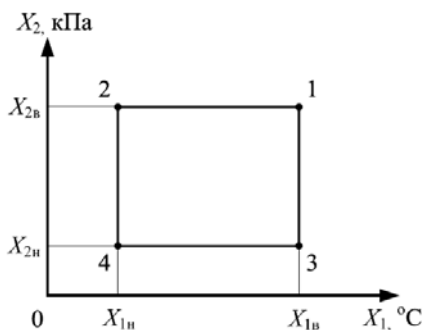


Рис. 8.5. Области варьирования факторов

При увеличении количества уровней факторов область варьирования будет выглядеть, примерно, как на рис. 8.6.

Основное требование к интервалу варьирования состоит в том, чтобы он превышал удвоенную среднюю квадратичную ошибку фактора:

$$2\sigma_{xy} < \Delta x_j < \frac{x_{j\max} - x_{j\min}}{2}.$$

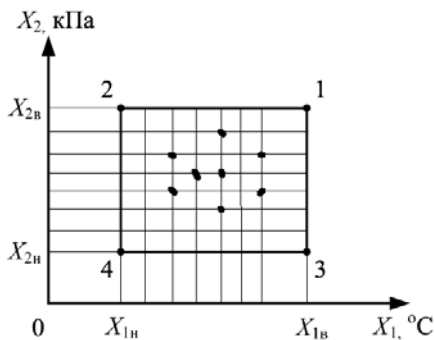


Рис. 8.6. Область варьирования при увеличении числа уровней факторов

Это требование связано с тем, что интервал между двумя соседними уровнями должен значимо влиять на переменную состояния. Обычно интервал выбирается на основе априорной информации или интуитивно, а затем уточняется после получения математической модели. Цена уточнения ощутима, так как повторение эксперимента

резко увеличивает число опытов. Удачный выбор интервалов варьирования гарантирует получение достоверной математической модели.

8.3. Построение матрицы планирования

План, содержащий запись всех комбинаций факторов или их части в кодированной форме, называется матрицей планирования.

Для построения матрицы планирования вводится приём чередования знаков. Для планов первого порядка в первом столбце матрицы планирования знаки не меняются, во втором – меняются поочерёдно, в третьем они чередуются через два, в четвертом – через четыре и т.д. Вводится столбец x_0 – столбец значений фиктивного фактора, участие которого в матрице планирования делает расчёты коэффициентов математической модели более общими (табл. 8.1).

Матрица планирования обладает ниже следующими свойствами:

Свойство симметричности:

$$\sum_{u=1}^N x_{ju} = 0,$$

т.е. сумма элементов любого столбца матрицы равна нулю.

Свойство нормирования:

$$\sum_{u=1}^N x_{ju}^2 = N,$$

где $j=1, 2, \dots, n$; $u = 1, 2, \dots, N$, т.е. сумма квадратов элементов каждого столбца равна числу опытов, где n – число факторов, N – число опытов (строк матрицы планирования).

Свойство ортогональности:

$$\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} = 0,$$

где $i, j=1, 2, \dots, n$; $i \neq j$, т.е. равенство нулю суммы почленных произведений любых двух вектор-столбцов матрицы.

Для рассмотренного нами примера матрица планирования эксперимента для двух факторов на двух уровнях выглядит следующим образом (табл. 8.2):

Таблица 8.1. Матрица планирования полнофакторного эксперимента от 2^2 до 2^5

№ п/п	Тип эксперимента			Планирование						
				X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	
1	ПФЭ 2 ⁵	ПФЭ 2 ³	ПФЭ 2 ²	+1	+1	+1	+1	+1	+1	
2				+1	-1	+1	+1	+1	+1	
3				+1	+1	-1	+1	+1	+1	
4				+1	-1	-1	+1	+1	+1	
5			+1	+1	+1	-1	+1	+1		
6			+1	-1	+1	-1	+1	+1		
7			+1	+1	-1	-1	+1	+1		
8			+1	-1	-1	-1	+1	+1		
9		ПФЭ 2 ⁴			+1	+1	+1	+1	-1	+1
10					+1	-1	+1	+1	-1	+1
11					+1	+1	-1	+1	-1	+1
12					+1	-1	-1	+1	-1	+1
13					+1	+1	+1	-1	-1	+1
14					+1	-1	+1	-1	-1	+1
15					+1	+1	-1	-1	-1	+1
16					+1	-1	-1	-1	+1	+1
17		+1	+1	+1	+1	+1	-1			
18		+1	-1	+1	+1	+1	-1			
19		+1	+1	-1	+1	+1	-1			
20		+1	-1	-1	+1	+1	-1			
21		+1	+1	+1	-1	+1	-1			
22		+1	-1	+1	-1	+1	-1			
23		+1	+1	-1	-1	+1	-1			
24		+1	-1	-1	-1	+1	-1			
25		+1	+1	+1	+1	-1	-1			
26		+1	-1	+1	+1	-1	-1			
27		+1	+1	-1	+1	-1	-1			
28		+1	-1	-1	+1	-1	-1			
29		+1	+1	+1	-1	-1	-1			
30		+1	-1	+1	-1	-1	-1			
31		+1	+1	-1	-1	-1	-1			
32		+1	-1	-1	-1	-1	-1			

Таблица 8.2. Матрица планирования ПФЭ типа 2^2

№ п/п	X ₀	План				Параметр оп- тимизации Y
		x ₁	X ₁	x ₂	X ₂	
		отн. ед.	T, °C	отн. ед.	P, КПа	
1	+1	+1	80	+1	1500	Y ₁
2	+1	-1	60	+1	1500	Y ₂
3	+1	+1	80	-1	1000	Y ₃
4	+1	-1	60	-1	1000	Y ₄

Трехуровневый план, в котором реализованы все возможные комбинации из n факторов на трёх уровнях, представляет собой полный факторный эксперимент типа 3^3 , например, для ПФЭ типа 3^2 показан в табл. 8.3.

Таблица 8.3. Матрица планирования ПФЭ типа 3^2

№ п/п	X_0	План				Параметр оп- тимизации Y
		x_1	X_1	x_2	X_2	
		отн. ед.	$T, ^\circ C$	отн. ед.	$P, \text{Кпа}$	
1	+1	+1	80	+1	1500	Y_1
2	+1	0	70	+1	1500	Y_2
3	+1	-1	60	+1	1500	Y_3
4	+1	+1	80	0	1250	Y_4
5	+1	0	70	0	1250	Y_5
6	+1	-1	60	0	1250	Y_6
7	+1	+1	80	-1	1000	Y_7
8	+1	0	70	-1	1000	Y_8
9	+1	-1	60	-1	1000	Y_9

8.4. Реализация полнофакторного эксперимента

После составления матрицы планирования приступают непосредственно к эксперименту. При этом учитывается время проведения опытов. Поскольку на изменение выходной переменной влияют помехи, план эксперимента реализуется несколько раз, получая m различных значений параметра оптимизации на каждой строке матрицы планирования.

Первоначально число m выбирают на основе априорных знаний об объекте исследования, а если таковые отсутствуют – случайно. Чтобы избежать появления некоторой неслучайной связи между реализациями эксперимента, рекомендуется опыты рандомизировать во времени. Рандомизация предполагает случайное расположение или случайную реализацию плана эксперимента. В таблице случайных чисел из любого столбца выбирают числа в порядке их следования от 1 до N . Если матрица предполагает серию опытов, тогда количество случайных чисел возрастает от 1 до mN . Каждое число из полученной таблицы берут только один раз. Пример показан в табл. 8.4.

Таблица 8.4. Результаты рандомизации опытов ПФЭ типа 2³

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
Рандомизированные опыты	05	02	03	07	06	01	08	04

Обработать результаты серии опытов можно с использованием методов математической статистики.

Расчёт ошибки опыта (дисперсии воспроизводимости) по всем точкам плана эксперимента на практике оказывается довольно сложной задачей. Часто экспериментатору заранее известна хорошая воспроизводимость опытов на объекте исследования. Это позволяет ему не проводить проверку однородностей дисперсий во всех точках факторного пространства. Такая априорная информация резко сокращает число опытов, поскольку не надо повторять опыты каждой строки матрицы планирования эксперимента.

В таком случае для расчёта ошибки опыта (дисперсии воспроизводимости) достаточно поставить несколько параллельных опытов в одной из точек факторного пространства. Обычно такой точкой принимают центр плана, где реализуется несколько опытов, и по ним рассчитывается ошибка опыта:

$$D_0^* = \frac{\sum_{k=1}^n (y_{0k} - \overline{y_0})^2}{m_0 - 1},$$

где y_{0k} – значение параметра оптимизации в k -ом опыте, $\overline{y_0}$ – среднее значение параметра оптимизации, m_0 – число параллельных опытов в центре плана.

8.5. Дробный факторный эксперимент

Полный факторный эксперимент обладает большой избыточностью опытов для построения модели объекта. Как правило, при числе факторов больше 4 ПФЭ использовать нецелесообразно из-за большого числа опытов, поэтому в случае линейной математической модели: $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$ можно сократить количество опытов, применяя дробный факторный эксперимент (ДФЭ) или так называемую дробную реплику. В этом случае лучше всего провести полный факторный эксперимент для меньшего числа факторов.

Число опытов при этом должно быть больше числа неизвестных коэффициентов в уравнении регрессии.

ДФЭ представляет собой некоторую часть (1/2, 1/4, 1/8 ...) от полного факторного эксперимента. Дробный факторный эксперимент, который используется для сокращения опытов в 2^p раз, где $p = 1, 2, 3, 4, \dots$ называется регулярным. Он позволяет производить расчёт коэффициента уравнения регрессии так же просто, как в случае полного факторного эксперимента.

Рассмотрим процедуру ДФЭ на примере. Пусть необходимо построить линейную регрессионную модель объекта, на выходную координату которого влияют три независимых фактора:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 .$$

Можно использовать план полного факторного эксперимента типа 2^3 с 8 опытами. Однако ограничимся половиной этого плана, т.е. четырьмя опытами, для чего столбец произведения факторов x_1x_2 приравняем третьему фактору (табл. 8.5).

Таблица 8.5. Половина ПФЭ типа 2^3

Номер опыта	X_0	План			Параметр оптимизации Y_u
		X_1	X_2	$X_3 = X_1 X_2$	
1	+1	+1	+1	+1	Y_1
2	+1	-1	+1	-1	Y_2
3	+1	+1	-1	-1	Y_3
4	+1	-1	-1	+1	Y_4

Такой сокращенный план носит название полуреплики от ПФЭ 2^3 .

Можно реализовать и другую полуреплику, где принято $x_3 = -x_1x_2$ (табл. 8.6).

Для обозначения дробных факторных экспериментов принято пользоваться условным обозначением 2^{n-p} . Основные показатели дробных полуреplik представлены в табл. 8.7.

Таблица 8.6. Вторая полуреплика от ПФЭ типа 2^3

Номер опыта	X_0	План			Параметр оптимизации Y
		X_1	X_2	$X_3 = X_1 X_2$	
1	+1	+1	+1	-1	Y_1
2	+1	-1	+1	+1	Y_2
3	+1	+1	-1	+1	Y_3
4	+1	-1	-1	-1	Y_4

Таблица 8.7. Основные показатели дробных реплик

Количество факторов	Дробная реплика	Условное обозначение	Количество опытов ДФЭ	Количество опытов ПФЭ
3	1/2 от 2^3	2^{3-1}	4	8
4	1/2 от 2^4	2^{4-1}	8	16
5	1/4 от 2^5	2^{5-2}	8	32
6	1/8 от 2^6	2^{6-3}	8	64
7	1/16 от 2^7	2^{7-4}	8	128
5	1/2 от 2^5	2^{5-1}	16	32
6	1/4 от 2^6	2^{6-2}	16	64
7	1/8 от 2^7	2^{7-3}	16	128

При построении ДФЭ используют следующее правило: для сокращения числа опытов при введении в планирование нового фактора нужно поместить этот фактор в вектор-столбец матрицы планирования ПФЭ, принадлежащий взаимодействию, которым можно пренебречь. Для этого экспериментатор должен обладать априорными сведениями об объекте. Каждая конкретная задача ставит свои условия для образования дробных реплик, поэтому общей теории синтеза планов ДФЭ не существует.

8.6. Алгоритм построения статистической модели объекта

Возникает задача разработки методики построения статистической модели РЭС при использовании полного и дробного факторного эксперимента. В упрощённом виде методику можно представить как алгоритм вариантов принятия решений по планам ПФЭ и ДФЭ, представленный на рис. 8.7.

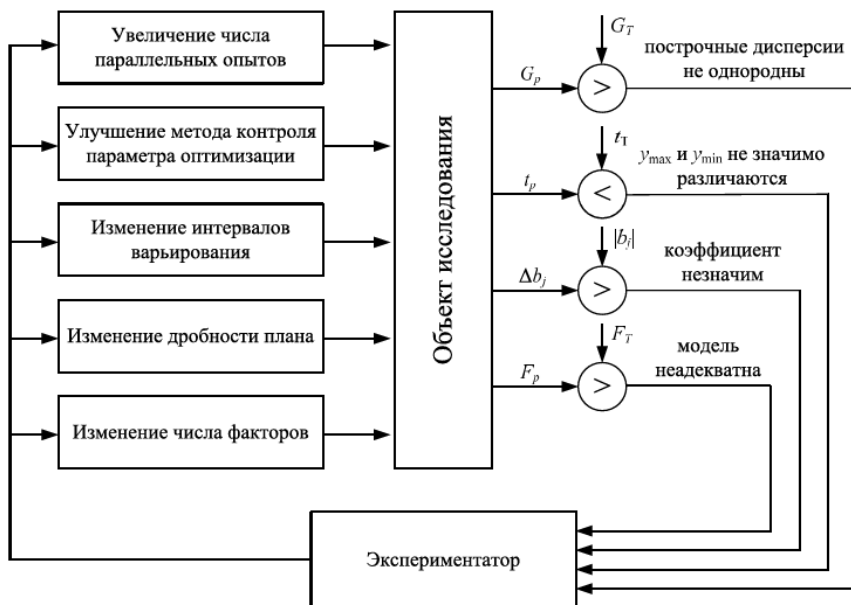


Рис. 8.7. Принятие решений по планам ПФЭ и ДФЭ

Алгоритм включает в себя следующие этапы:

- выбор параметра оптимизации;
- выбор факторов;
- оценка области определения факторов;
- выбор нулевых уровней факторов;
- выбор интервалов варьирования факторов;
- построение матрицы планирования эксперимента;
- проведение эксперимента;
- расчёт средних значений параметра оптимизации;
- расчёт ошибки опыта (дисперсии воспроизводимости);
- расчёт коэффициентов уравнения регрессии;
- проверка адекватности уравнения регрессии;
- принятие решения об использовании модели.

Планирование эксперимента позволяет получить данные о параметрах ЭРЭ в том случае, когда теоретический анализ затруднён или невозможен, применить научные методы оценки показателей качества, повысить надёжность выпускаемых радиоэлектронных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баканов, Г.Ф. Конструирование и производство радиоаппаратуры: учебное пособие / Г.Ф. Баканов, С.С. Соколов. – Москва: Издательский центр «Академия», 2011. – 384 с.
2. Баканов, Г.Ф. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств: учебное пособие / Г.Ф. Баканов, С.С. Соколов, В.Ю. Суходольский; под ред. И.Г. Мироненко. – Москва: Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.
3. Белоусов, О.А. Основные конструкторские расчеты в РЭС: учебное пособие / О.А. Белоусов, Н.А. Кольтюков, А.Н. Грибков. – Тамбов: Изд-во Тамбовского гос. техн. ун-та, 2007. – 84 с.
4. Боровиков, С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности / С.М. Боровиков. – Минск: Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.
5. Бородин, С.М. Обеспечение надёжности при проектировании РЭС: учебное пособие / С.М. Бородин. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2010. – 106 с.
6. 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.
7. Дядик, В.Ф. Статистические методы контроля и управления: учебное пособие / В.Ф. Дядик, С.А. Байдали, Т.А. Байдали. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 144 с.
8. Зеленский, А.В. Основы конструирования электронных средств: учебник / А.В. Зеленский, Г.Ф. Краснощёкова. – Самара: Изд-во СГАУ, 2014. – 228 с.
9. Зеленский, В.А. Основы конструкторско-технологического проектирования радиоэлектронных средств / В.А. Зеленский. – Самара: Изд-во СГАУ, 2016. – 80 с.
10. Кечиев, Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л.Н. Кечиев. – Москва: Издательский дом «Технологии», 2007. – 616 с.
11. Князев, А.Д. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры с учётом электромагнитной совместимости / А.Д. Князев,

- Л.Н. Кечнев, Б.В. Петров. – Москва: Радио и связь, 1989. – 222 с.
12. Кольтюков, Н.А. Основы эргономики и дизайна РЭС: учебное пособие по курсовому проектированию / Н.А. Кольтюков, О.А. Белоусов. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 124 с.
 13. Компоновка и конструкции микроэлектронной аппаратуры / ред.: Б.В. Высоцкий, В.Б. Пестряков, О.А. Патлин. – Москва: Радио и связь, 1982. – 208 с.
 14. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: учебник для вузов / К.И. Билибин [и др.]. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. – 568 с.
 15. Кофанов, Ю.Н. Автоматизация проектирования РЭС. Топологическое проектирование печатных плат: учебное пособие / Ю.Н. Кофанов, А.В. Сарафанов, С.И. Трегубов. – [2 изд., перераб. и доп.]. – Москва: Радио и связь, 2001. – 220 с.
 16. Кофанов, Ю.Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронных средств. – Москва: Изд-во «Радио и связь», 1991. – 360 с.
 17. Листьев, В.П. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие / В.П. Листьев. – Москва: Московский государственный университет экономики, статистики и информатики, 2006. – 199 с.
 18. Лопаткин, А.В. Конструирование и технология РЭС: учебное пособие / А.В. Лопаткин. – Нижний Новгород: Изд-во НГТУ, 2001. – 40 с.
 19. Любченко, Е.А. Планирование и организация эксперимента: учебное пособие / Е.А. Любченко, О.А. Чуднова. – Владивосток: ТГЭУ, 2010. – 156 с.
 20. Матвиевский, В.Р. Проектирование технических систем: учебное пособие / В.Р. Матвиевский. – Москва: Изд-во МГИЭМ, 2003. – 103 с.
 21. Медведев, В.А. Конструирование и технология производства электронных устройств: учебное пособие / В.А. Медведев. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. – 70 с.
 22. Медведев, А.М. Сборка и монтаж электронных устройств / А.М. Медведев. – Москва: Техносфера, 2007. – 256 с.

23. Муромцев, Ю.Л. Информационные технологии проектирования радиоэлектронных средств: учебное пособие / Ю.Л. Муромцев, Д.Ю. Муромцев, И.В. Тюрин. – Москва: Издательский центр «Академия», 2010. – 384 с.
24. Лазутин, Ю.Д. Технология электронных средств: учебник / Ю.Д. Лазутин, В.П. Корячко, В.В. Сускин. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 286 с.
25. Надёжность систем и техногенный риск / В.А. Акимов, В.Л. Лапин, В.М. Попов [и др.]. – Москва: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002. – 368 с.
26. Носов, В.В. Основы конструирования приборов и экспериментальных установок: учебное пособие / В.В. Носов. – Санкт-Петербург: Изд-во национального минерально-сырьевого университета «Горный», 2013. – 139 с.
27. Основы проектирования электронных средств: учебное пособие. В 2 частях. Часть 1 / А.В. Зеленский, В.А. Зеленский, Г.Ф. Краснощекова [и др.]. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2007. – 243 с.
28. Основы проектирования электронных средств: учебное пособие. В 2 частях. Часть 2 / А.В. Зеленский, В.А. Зеленский, Г.Ф. Краснощекова [и др.]. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2008. – 167 с.
29. Пирогова, Е.В. Проектирование и технология печатных плат: учебник / Е.В. Пирогова. – Москва: Форум, Инфа-М, 2005. – 560 с.
30. Радиоэлектронная аппаратура и основы её конструкторского проектирования: учебно-методическое 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.
31. Сарафанов, А.В. Основы проектирования электронных средств: Техническое задание. Формирование и анализ: учебное пособие / А.В.Сарафанов, С.И. Трегубов. – Красноярск: Изд-во Красноярского гос. техн. ун-та, 2005. – 140 с.
32. Селиванова, З.М. Технология радиоэлектронных средств: учебное пособие по курсовому проектированию / З.М. Селиванова. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 100 с.

33. Спирин, Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / Н.А. Спирин, В.В. Лавров. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 257 с.
34. Степаненко, И.П. Основы микроэлектроники: учебное пособие / И.П. Степаненко. – Москва: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 488 с.
35. Тютюнник, В.М. Информационные технологии проектирования РЭС. Основные понятия, архитектура, принципы: учебное пособие / В.М. Тютюнник, Ю.Л. Муромцев, Л.П. Орлова. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. ун-та, 2004. – 96 с.
36. Фомин, А.В. Инженерные методы при обеспечении качества при проектировании ЭС / А.В. Фомин, О.Н. Умрихин, М.Ф. Митюшин. – Москва: Изд-во МАИ, 2007. – 276 с.
37. Юрков, Н.К. Технология производства электронных средств: учебник / Н.К. Юрков. – Санкт-Петербург: Изд-во Лань, 2014. – 480 с.
38. Юрков, Н.К. Технология радиоэлектронных средств: учебник / Н.К. Юрков. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. – 640 с.
39. Ямпурин, Н.П. Основы надёжности электронных средств: учебное пособие / Н.П. Ямпурин, А.В. Баранова. – Москва: Издательский центр «Академия», 2010. – 240 с.