МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пензенский государственный университет» (ПГУ)

Н. К. Юрков

Технология радиоэлектронных средств

Допущено Министерством образования и науки
Российской Федерации в качестве учебника
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности 210201
«Проектирование и технология РЭС»

Пенза
Издательство ПГУ
2012

УДК 621.396.69.002
Ю75

Р е ц е н з е н т ы:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Микрорадиоэлектроника и технология радиоаппаратуры» Санкт-Петербургского государственного технического университета (ЛЭТИ), заслуженный деятель науки РФ
И. Г. Мироненко;

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана, член-корреспондент РАН
В. А. Шахнов;

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные средства и технологии» Самарского государственного аэрокосмического университета им. С. П. Королева, заслуженный работник высшей школы РФ
С. А. Прохоров

Юрков, Н. К.
Ю75 Технология радиоэлектронных средств : учеб. / Н. К. Юрков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – 640 с.
ISBN 978-5-94170-428-6

Учебник посвящен вопросам технологии производства радиоаппаратуры для радиосвязи, радиовещания, телевидения, радиолокации, радионавигации и других направлений науки и техники. Наиболее общим названием изделий радиоэлектроники, рекомендованным в стандартах, является термин «радиоэлектронное средство» (РЭС), понимаемый как техническое изделие определенной сложности или его составная часть, в основу действия которого положены принципы радиотехники и электроники. Разделы учебника изложены весьма подробно и логично, основываются на глубоком знании электроники, радиотехники, системотехники, физико-химических положений технологии РЭС. По своей структуре, содержанию и объему учебник соответствует примерной рабочей программе курса «Технология радиоэлектронных средств».

Издание подготовлено на кафедре «Конструирование и производство радиоаппаратуры» и рекомендуется в качестве учебника для студентов специальности 210201 «Проектирование и производство РЭС» и может быть полезно для студентов родственных специальностей.

УДК 621.396.69.002

ISBN 978-5-94170-428-6

© Юрков Н. К., 2012

© Пензенский государственный университет, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ 8
ПРЕДИСЛОВИЕ 12
ВВЕДЕНИЕ 13
ГЛАВА 1. ЕДИНАЯ СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА. 18
1.1. Структура технологических процессов. Цели и задачи ЕСТПП 18
1.2. Технологическая подготовка производства 24
1.3. Средства выполнения технологических процессов 26
1.4. Требования ЕСТПП к технологическим процессам 28
ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ 35
2.1. Основные понятия и определения в теории и практике производственных технологий 35
2.2. Иерархический подход в конструировании и технологии радиоэлектронных средств 41
2.3. Особенности радиоэлектронных средств 45
2.4. Технология радиоэлектронных средств как сложная система 47
2.5. Основные направления развития технологии радиоэлектронных средств 59
2.6. Построение ТП в зависимости от типа производства 61
2.7. Классификация технологических процессов 63
2.8. Этапы разработки технологических процессов 66
2.8.1. Основные понятия проектирования технологии 66
2.8.2. Выбор структуры технологической системы по экономическим показателям 69
2.8.3. Этапы разработки частного технологического процесса ... 80
2.8.4. Конструкторско-технологическая система обозначения технологических документов 97
2.9. Анализ и расчет технологичности конструкции изделия 102
2.9.1. Основные показатели технологичности 102
2.9.2. Общая классификация технологичности конструкции изделия 110
2.9.3. Взаимосвязь видов технологичности конструкции изделия 117

2.9.4. Этапы отработки конструкции на технологичность 121
2.9.5. Показатели технологичности радиоэлектронных средств, характеризующие конструкцию 129
2.9.6. Показатели технологичности радиоэлектронных средств, характеризующие технологию изготовления изделий 131
2.9.7. Базовые показатели и уровень технологичности конструкции радиоэлектронных средств 132
2.9.8. Показатели технологичности конструкций узлов и блоков радиоэлектронных средств 135
2.9.9. Пути повышения уровня технологичности 137
2.10. Устойчивость технологического процесса 139
2.11. Структура жизненного цикла радиоэлектронных средств длительного функционирования 142
ГЛАВА 3. ТЕХНОЛОГИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ 145
3.1. Классификация печатных плат, области применения 145
3.2. Материалы печатных оснований..... 151
3.2.1. Требования к материалам печатных оснований 151
3.2.2. Конструктивно-технологическая характеристика ПП..... 153
3.3. Фоторезисты 161
3.4. Диазокопирование 165
3.5. Методы изготовления одно- и двусторонних печатных плат 167
3.6. Особенности производства многослойных печатных плат 177
3.6.1. Получение внутренних слоев печатных плат 177
3.6.2. Метод ПАФОС 182
3.6.3. Получение наружных слоев печатных плат..... 184
3.6.4. Паяльные маски для наружных слоев печатных плат 190
3.7. Выбор технологических методов в производстве печатных плат 192
3.7.1. Особенности прессования многослойных плат..... 194
3.7.2. Производство многослойных печатных плат с межслойными соединениями, выполненными механическими деталями 200
3.7.3. Метод металлизации сквозных отверстий 200
3.7.4. Метод попарного прессования 213
3.8. Перспективные и новые технологии производства печатных плат 220
3.8.1. Прямая металлизация 220
3.8.2. Гибкие печатные платы..... 221

3.8.3. Полиимидные платы 229
3.8.4. Платы алюминиевые с анодированием 231
3.8.5. Керамические платы 232
3.8.6. Металлические платы 233
3.8.7. Печатные платы на металлических основаниях 237
3.8.8. Материалы и конструкции оснований ППМ 239
3.8.9. Конструкции гибких схем 246
3.8.10. Технологии получения микроотверстий 253
3.9. Нанесение влагозащитных покрытий 257
ГЛАВА 4. МЕТОДЫ ВЫПОЛНЕНИЯ МОНТАЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ 275
4.1. Технология жгутового монтажа 275
4.2. Технология накрутки 283
4.3. Пайка монтажных соединений 287
4.3.1. Пайка: определение, физическая сущность процесса 287
4.3.2. Факторы, определяющие смачиваемость и паяемость печатных плат 307
4.3.3. Групповая пайка элементов с радиальными выводами 308
4.3.4. Пайка алюминия и его сплавов 318
4.3.5. Методы пайки компонентов 329
4.3.6. Пайка в инертной атмосфере 333
4.3.7. Пайка бессвинцовыми припоями 336
4.3.8. Пайка конструкционных материалов 345
4.4. Поверхностный монтаж радиоэлектронных средств 348
4.4.1. Основные понятия и определения 348
4.4.2. Компоненты и корпуса 352
4.4.3. Способы упаковки компонентов 360
4.4.4. Выбор адгезивов 368
4.5. Технология клеевых соединений 370
4.5.1. Применение клеев в производстве радиоэлектронных средств 370
4.5.2. Применение термостойких клеев 374
4.5.3. Быстросхватывающиеся клеи для сборки изделий на печатных платах 376
4.5.4. Клеи в тензометрии 379
4.5.5. Клеи для магнитопроводов 380
4.6. Монтаж тканными устройствами коммутации 381

4.7. Стежковый монтаж радиоэлектронных средств 384
ГЛАВА 5. МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ 388
5.1. Расчет размерных цепей 388
5.2. Методика расчета размерных цепей 399
5.3. Схемы базирования различных геометрических тел 402
5.4. Производственные погрешности, причины возникновения, законы распределения 410
5.4.1. Прочность обработки. Производственные погрешности .. 414
5.5. Влияние шероховатости поверхностей на точность изделия . 417
5.6. Аналитический метод расчета ожидаемой точности обработки 420
5.7. Технологические процессы и качество. Влияние технологии производства на надежность радиоэлектронных средств 424
5.8. Защита радиоэлектронных средств от воздействия климатических факторов 446
ГЛАВА 6. СУЩНОСТЬ И ОСОБЕННОСТИ СБОРКИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ 459
6.1. Анализ точности сборочного соединения 459
6.1.1. Основные понятия теории точности 459
6.1.2. Систематические и случайные погрешности 460
6.2. Схемы сборки радиоэлектронных средств 466
6.2.1. Правила построения сборочной операции 473
6.2.2. Согласование ТП сборки по организационным формам ... 477
6.3. Виды механических соединений 479
6.3.1. Разъемные и неразъемные механические соединения 479
6.3.2. Требования, предъявляемые к соединениям 483
6.3.3. Соединения расклепыванием и развальцовкой 484
6.3.4. Соединения с помощью цапф (выступов) 491
6.4. Виды неисправностей радиоэлектронных средств и методы их устранения 494
6.4.1. Классификация дефектов радиоэлектронных средств 496
6.4.2. Испытания радиоэлектронных средств. Испытания как основная форма контроля 499
6.4.3. Испытания радиоэлектронных средств на механические воздействия 513

6.4.4. Испытания радиоэлектронных средств на климатические воздействия 519
6.4.5. Виды дефектов и способы их обнаружения 523
6.4.6. Описание стадий пайки и их связь с рентгеновскими изображениями 526
6.5. Непаяные соединения, выполняемые запрессовкой – новый класс соединений на российском рынке электронной техники 532
ГЛАВА 7. КОНТРОЛЬ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ 547
7.1. Системы технического контроля при производстве радиоэлектронных средств 547
7.1.1. Понятия технического контроля и основная терминология 547
7.1.2. Виды технического контроля 549
7.1.3. Основные показатели контроля 552
7.1.4. Методика выбора средств контроля и испытаний 559
7.1.5. Технологическая регулировка и настройка радиоэлектронных средств 560
7.2. Методы тестирования печатных плат. Выбор стратегии контроля 568
7.2.1. Взаимосвязь показателей контролепригодности с характеристиками радиоэлектронных средств 585
7.3. Оптические методы контроля в производстве печатных плат 598
7.4. Наладка радиоэлектронных средств 603
7.5. Основные понятия поиска неисправностей 613
7.5.1. Классификация дефектов радиоэлектронных средств 615
7.6. Математические модели – основа решения задач диагностирования 618
7.7. Основы моделирования конструкций и технологических процессов производства радиоэлектронных средств 621
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 634
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 636

Список принятых сокращений

АСТПП – автоматизированная система технологической подготовки производства

АСУ – автоматизированная система управления

АСУТП – автоматизированная система управления технологическим процессом

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика биоповреждений

БИС – большая интегральная схема (микросхема)

БНК – базовая несущая конструкция

ВМ – ведомость материалов

ВО – ведомость оснастки

ВР – ведомость расцеховки

ВТД – ведомость технологических документов

ВТП – ведомость деталей (сборочных единиц) к типовому ТП

ГАП – гибкое автоматизированное производство

ГОС – государственный образовательный стандарт

ГПК – гибкий печатный кабель

ГПП – гибкая печатная плата

ГПС – гибкая производственная система

ГСС – генератор стандартных сигналов

ГТИ – главный технолог изделия

ДПП – двусторонняя печатная плата

ДЭРЭ – дискретный электрорадиоэлемент

ЕСДП – единая система допусков и посадок

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

ЕСКД – единая система конструкторской документации

ЕСТД – единая система технологической документации

ЕСТПП – единая система технологической подготовки производства

ЖКИ – жидкокристаллический индикатор

ЗУ – запоминающее устройство

ИВЭП – источник вторичного электропитания

ИК-луч – инфракрасный луч

ИМС – интегральная микросхема
ИС – интегральная схема
ИСЗ – искусственный спутник Земли
КД – конструкторская документация
КИО – контрольно-измерительное оборудование
КК – комплектовочная карта
КПД – коэффициент полезного действия
КС – конструкционная система
КТП – карта технологического процесса
КТТП – карта типового ТП
КЭ – карта эскизов и схем
ЛП – линия передачи
ЛЭП – линия электропитания
МГВ – метод групповой взаимозаменяемости
МК – маршрутная карта
МККП – многослойная керамическая коммутационная плата
ММСО – метод металлизации сквозных отверстий
МНВ – метод неполной взаимозаменяемости
МП – микропроцессор
МПВ – метод полной взаимозаменяемости
МПП – многослойная печатная плата
МПр – метод пригонки
МР – метод регулировки
НИР – научно-исследовательская разработка
НК – несущая конструкция
НСО – неразборная специальная оснастка
НТД – нормативно-технологическая документация
ОК – операционная карта
ОКТ – операционная карта типового ТП
ОГТ – отдел главного технолога
ОЗУ – оперативное запоминающее устройство
ОК – операционная карта
ОКГ – оптический квантовый генератор
ОКР – опытно-конструкторская разработка
ОПП – односторонняя печатная плата
ОСОТП – отраслевая система оценки технологичности изделия

ОТК – отдел технического контроля

ПЗУ – постоянное запоминающее устройство

ПИ – предъявительские испытания

ПМ – поверхностный монтаж

ПП – печатная плата

ПСИ – приемосдаточные испытания

ПУ – печатный узел

ПХВ – полихлорвинил

ПЭ – потребитель электроэнергии

ПЭВМ – персональная электронная вычислительная машина (компьютер)

РА – радиоаппаратура

РНО – регулировочные и настроечные операции

РП – рельефные платы

РТС – радиотехническая система

РЭС – радиоэлектронные средства

РЭС ДФ – радиоэлектронное средство длительного функционирования

РЭУ – радиоэлектронные устройства

СРО – сборно-разборная оснастка

САПР – система автоматизированного проектирования

СБ – сборочный чертеж

СБИС – сверхбольшая интегральная схема (микросхема)

СВЧ – сверхвысокие частоты

СНИП – санитарные нормы и правила

СНО – специализированная наладочная оснастка

СО – система охлаждения

СПИД – система «станок–приспособление–инструмент–деталь»

СпИС – специализированная интегральная схема (микросхема)

СПФ – сухой пленочный фоторезист

СТ МЭК – стандарт Международной электротехнической комиссии

СТО – специальное технологическое оснащение

СФПН – стеклотекстолит фольгированный нагревостойкий

ТД – технологическая документация

ТЗ – техническое задание

ТИ – технологическая инструкция
ТК – технический контроль
ТКИ – технологичность конструкции изделия
ТКЛР – температурный коэффициент линейного расширения
ТО – технологическая операция
ТП – технологический процесс
ТПП – технологическая подготовка производства
ТС – технологическая система
ТТЛ – транзисторно-транзисторная логика
ТУ – технические условия
ТУК – тканое устройство коммутации
ТЭЗ – типовой элемент замены
ТЭС – типовой элемент сборки
УАМ – установка автоматизированного монтажа
УБНК – унифицированная базовая несущая конструкция
УБО – универсально-безналадочная оснастка
УГО – условное графическое обозначение
УНО – универсально-наладочная оснастка
УСО – универсально-сборная оснастка
УФ-луч – ультрафиолетовый луч
ФЧХ – фазочастотная характеристика
ФШ – фотошаблон
ЧПУ – числовое программное управление
ЭА – электронная аппаратура
ЭВА – электронно-вычислительная аппаратура
ЭВМ – электронно-вычислительная машина (компьютер)
ЭВС – электронно-вычислительные средства
ЭКК – электроконтрольная карта
ЭЛТ – электронно-лучевая трубка
ЭП – эскизный проект
ЭРА – электрорадиоаппаратура
ЭРЭ – электрорадиоэлемент

Предисловие

В начале XXI в. трудно найти область человеческой деятельности, в которой важным помощником человека не являлись бы радиоэлектронные средства (РЭС). Устройства РЭС чрезвычайно разнообразны как по функциональному назначению, так и по их конструктивному исполнению. Но насколько разнообразны конструкции устройств внешне, настолько они близки внутренне. При внимательном рассмотрении практически любого РЭС можно выделить определенное количество составных частей, которые по своему функциональному назначению будут общими для бесконечного множества других РЭС.

Видимая и очевидная составляющая РЭС – его корпус, внешняя оболочка. Во многом именно она определяет отношение человека ко всему устройству в целом. И это важно. Культуре дизайна и эргономики приборов необходимо уделять большое внимание. Но, кроме воздействия на эстетические эмоции человека, корпус совместно с несущими конструкциями, заключенными в нем или составляющими с ним единое целое, служит для объединения и закрепления всех составных частей устройства.

Важнейшей частью любого РЭС является его элементная база: резисторы, конденсаторы, транзисторы, интегральные микросхемы и т.д., осуществляющие элементарные преобразования подаваемых на них сигналов, – это те «винтики» большой машины, без которых машина работать не будет, но в то же время «винтики», за редким исключением, отличаются превосходной взаимозаменяемостью.

Существует также некоторое количество немаловажных компонентов, выполняющих роль посредника в деле общения человека с РЭС, например, электронно-лучевые трубки (ЭЛТ), акустические динамики, микрофоны, конденсаторы переменной емкости и многое другое.

Но что же позволяет осуществить качественный переход от большого количества разрозненных составных частей к единому, осмысленному устройству? Ответ таков – это огромное количество коммутационных устройств – обычные электрические провода, коаксиальные кабели, волноводы, световоды, монтажные панели и, наконец, многочисленное семейство печатных плат (ПП).

Введение

Предлагаемый вашему вниманию учебник посвящен технологии производства радиоэлектронных средств. Темы изложены в соответствии с последовательностью, определенной ГОСом, и будут полезны прежде всего студентам радио- и приборостроительных специальностей и молодым специалистам.

Развитие радиоэлектроники оказывает существенное влияние на научно-технический прогресс и успехи в социально-экономической области. Машиностроение, которое играет ключевую роль в ускорении научно-технического прогресса, нуждается в надежно работающих сложных изделиях радиоэлектроники, органически входящих в качестве комплектующих элементов в станки с числовым программным управлением, роботах и других устройствах гибких производственных систем. Транспорт, энергетика, космические системы и другие направления нашей экономики, где велики последствия одного-единственного отказа, также нуждаются в высоконадежных изделиях радиоэлектроники. Надежность этих изделий закладывается при их проектировании, обеспечивается при производстве и поддерживается при эксплуатации в составе РЭС. С другой стороны, изделия радиоэлектроники должны рассматриваться как результат разработки схемы, конструкции и технологии. Рассмотрим основные определения понятий и связанных с ними терминов. Исходными являются понятия радиоэлектроники и радиотехники. Радиоэлектроника – это область науки и техники, охватывающая широкий круг вопросов использования электромагнитной энергии для передачи, приема и преобразования сигналов и содержащейся в них информации.

Радиотехника – область науки и техники, связанная с генерированием, преобразованием, излучением и приемом электромагнитных колебаний и волн радиочастотного диапазона. В соответствии с международным регламентом границы радиочастот лежат в пределах 3 кГц...3 ГГц, которым соответствуют длины волн от 100 км до 0,1 мм. Таким образом, радиотехника является частью радиоэлектроники. Кроме того, к радиоэлектронике относят технику инфранизких частот, инфракрасную технику и оптоэлектронику. С технической стороны радиоэлектроника также охватывает автоматику, техническую кибернетику, вычислительную технику и электронику.

Как отрасль промышленности радиотехника связана с разработкой, производством и применением радиоаппаратуры для радиосвязи, радиовещания, телевидения, радиолокации, радионавигации и других направлений техники передачи информации. В более широком смысле, вместо слова радиоаппаратура применяется термин «радиоэлектронные средства», под которым подразумеваются приборы и технические устройства, предназначенные для преобразования электрических и электромагнитных сигналов с определенными целями. Наиболее общим названием изделий радиоэлектроники, рекомендованным в стандартах, является термин «радиоэлектронное средство», понимаемый как техническое изделие определенной сложности или его составная часть, в основу действия которого положены принципы радиотехники и электроники.

Радиоэлектронная система – это совокупность функционально взаимодействующих автономных радиоэлектронных комплексов и устройств, которые образуют целостное единство, обладающее свойством перестроения структуры в целях рационального выбора и использования входящих средств нижних уровней при решении задач. Примером может служить аэродромная система управления воздушным движением, которая производит измерения траекторных параметров самолетов и управление ими при полетах по кругу в районе аэродрома. В состав такой системы входят бортовой радиоэлектронный комплекс и наземные радиолокационный и вычислительный комплексы, которые в свою очередь состоят из радиоэлектронных устройств (РЭУ), т.е. РЭС более низкого уровня. Перестроение структуры данной системы вызывается условиями воздушной обстановки в районе аэродрома, в зависимости от интенсивности воздушного движения назначается оптимальная (с точки зрения безопасности) совокупность работающих РЭС.

В зависимости от сложности решаемых технических задач радиоэлектронная система может быть частью другой системы более высокого уровня.

Разновидностью радиоэлектронной системы является радиотехническая система, под которой понимают совокупность РЭС для передачи сообщений и команд по радиоканалам, состоящих из радиопередатчиков, линий радиосвязи и радиоприемников. Другой важной разновидностью радиоэлектронной системы служит вычислительная система, определяемая как взаимосвязанная совокупность вычислительных комплексов и устройств, согласованных по быстродействию, пропускной способности и другим параметрам.

Отличительным признаком как радиотехнической, так и вычислительной системы является возможность перестроения ее структуры с целью наиболее эффективного использования входящих в систему технических средств.

В составе любой радиоэлектронной системы могут присутствовать механические, электромеханические и другие средства, без которых невозможна ее эксплуатация. Эти средства могут входить в РЭС как отдельно, так и внутри радиоэлектронных комплексов или устройств.

Электрическая схема РЭС есть совокупность электрорадиоэлементов (ЭРЭ), соединенных между собой в соответствии с заданным принципом действия радиоэлектронной системы или в соответствии с функциями, выполняемыми данным РЭС внутри другого РЭС более высокого уровня. Иными словами, электрическая схема отображает те преобразования полезных сигналов и помех, которые происходят с ними при прохождении через РЭС.

Схемотехника – прикладная научная дисциплина, занимающаяся анализом и синтезом электрических схем РЭС. Теоретическим фундаментом схемотехники является радиотехника.

Под конструкцией понимается совокупность деталей и материалов с разными физическими свойствами, находящихся в определенной физической связи (электромагнитной, тепловой, механической), обеспечивающая выполнение заданных функций с необходимой точностью и надежностью под влиянием внешних и внутренних воздействий и воспроизводимая в условиях производства. Конструкция определяет взаимное расположение частей в пространстве, способы их соединения, характер взаимодействия, а также материал, из которого они изготовлены.

Конструкция РЭС отличается рядом особенностей, которые выделяют 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 термочувствительных элементов;

5) слабой связью внутренней структуры конструкции с ее внешним оформлением.

Различают два понимания термина «конструирование». Конструирование РЭС как вид инженерной деятельности есть совокупность работ, выполняемых при создании проекта конструкции аппаратуры. Конструирование РЭС как прикладная научная дисциплина – это обобщение методов анализа и синтеза конструкций. Теоретический фундамент конструирования РЭС составляют: системный анализ, математическое моделирование, исследование операций, планирование эксперимента, теория вероятностей и математическая статистика, теория надежности, теория оптимизации и другие научные направления. В настоящее время на основе этих фундаментальных направлений формируется самостоятельная теория конструирования РЭС как система научных принципов и общих закономерностей разработки конструкций в радиоэлектронике. Ускоренное развитие теории конструирования РЭС требует применения ЭВМ, что вызвано усложнением практических задач создания конструкций и усилением взаимосвязи конструирования с системотехникой.

Радиоаппаратурой (РА) принято называть приборы, аппараты, комплексы, выполняющие функции радиосвязи, радиовещания, телевидения, радиолокации, радионавигации, радиоастрономии, радиотелеметрии и др. Специфика функций и конструкторско-технологических особенностей этих изделий обусловила организацию их производства в отдельных до известной степени автономных отраслях промышленности.

Основными эксплуатационными и технологическими требованиями, предъявляемыми к изделиям РА, являются: большая мощность передатчиков и высокая чувствительность приемников при относительно малых габаритах и массе; высокая точность работы счетно-решающих и исполнительных механизмов и устройств; высокая надежность и долговечность работы в различных климатических условиях; удобство обслуживания в эксплуатации, легкость и доступность настройки параметров; оптимальная стоимость изготовления.

Для более четкого понимания задач, стоящих при проектировании и выполнении РЭС на всех стадиях его производства, имеет

смысл определить: что же нужно понимать под различными составляющими объекта производства.

Особенно сложной в производстве РЭС оказывается задача формализации (математического описания) и моделирования ТП. Поэтому современный инженер-технолог РЭС, кроме знаний физической сущности технологии, должен владеть специальными математическими методами анализа, оптимизации и формализации ТП. Основой оптимизации ТП с применением ЭВМ являются методы линейного, нелинейного, целочисленного, динамического программирования и теории массового обслуживания.

В результате решения задачи формализации и моделирования можно создать оптимальную структуру производственного процесса и его отдельных звеньев, получить такой ТП, который наиболее гибко реагирует на изменения внешних условий и характеристик звеньев, а также перейти к созданию автоматизированных ТП, что в свою очередь позволяет существенно повысить техническую и экономическую эффективность, производительность, качество изделий.

Процессы производства РЭС и их функционирования имеют неизбежный, неустранимый стохастический (случайный) характер, поэтому задачу оптимального выбора следует формулировать в вероятностной форме.

Для каждой технологической структуры задачи системной отработки формулируются по-разному, что приводит к специфике оптимизационных моделей. Несмотря на разнообразие последних, удается выделить типовые многоальтернативные оптимизационные модели, связанные с обобщенной структурой сложных систем, разработать алгоритмическое обеспечение.

Глава 1

Единая система технологической подготовки производства

1.1. Структура технологических процессов. Задачи и цели ЕСТПП

Изделием называют объект производства, включаемый в номенклатуру продукции предприятия.

Устанавливаются следующие виды изделий: детали, сборочные единицы, комплексы, комплекты (ГОСТ 2.101–68).

Деталью называют изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала без применения сборочных операций. Деталь является первичным элементом сборки, например: валик из одного куска металла; литой корпус; пластина из биметаллического листа; печатная плата; маховик из пластмассы (без арматуры); отрезок кабеля или провода заданной длины и т.п.

Сборочной единицей называют изделие, составные части которого подлежат соединению между собой на предприятии-изготовителе.

Комплексом называют два и более специфицированных изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций.

Комплектом называют два и более изделия, не соединенные на предприятии-изготовителе сборочными операциями, имеющие общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера, например, комплект инструмента, комплект запасных частей, комплект измерительной аппаратуры, комплект тары и др.

К покупным относят изделия, не изготовляемые на данном предприятии, а получаемые им в готовом виде, кроме получаемых в порядке кооперирования.

Сочетание радиотехнических функций с физико-механическими в изделиях РА обусловливает наличие большого разнообразия конструкций деталей как по геометрической форме, размерам и

применяемым материалам, так и по специфическим техническим требованиям, предъявляемым к ним. Эта особенность конструкций деталей в свою очередь накладывает отпечаток на технологию изготовления.

В промышленном производстве деталей РА наряду с традиционными процессами формообразования – литьем, механической обработкой, холодной штамповкой и др. – применяют новые, такие как химическая, фотохимическая и электрофизическая обработки, тонкопленочная технология и др.

Узлом называется разъемное или неразъемное соединение составных частей изделия. В узел могут входить детали, другие более простые узлы и покупные изделия.

Узел, входящий непосредственно в изделие, называют группой; узел, входящий непосредственно в группу, – подгруппой 1-го порядка и т.д.

Аппарат (прибор) – это устройство, имеющее самостоятельное конструктивное или эксплуатационное назначение и состоящее из деталей и узлов, соединенных между собой.

Система представляет собой комплекс отдельных аппаратов (приборов), не связанных между собой на заводе-изготовителе сборочными и монтажными операциями, но имеющих общее эксплуатационное назначение. При эксплуатации прибора системы соединяют между собой механической, электрической, оптической и другими связями.

В ряде случаев для удобства изготовления, контроля и эксплуатации изделие делят на блоки.

В технологическом отношении блок представляет собой часть изделия (или изделие), изготовляемую независимо от других его частей. Функции блока могут быть заданы определенными параметрами, связанными с устройством, в которое он входит. По этим параметрам можно контролировать блок в производстве и эксплуатации независимо от других блоков, с которыми он может быть функционально связан в изделии.

Дадим основные определения понятий, используемых в курсе «Технология РЭС».

Производственный процесс – совокупность всех действий людей, орудий труда и естественных процессов, в результате которых поступающие на предприятие материалы и полуфабрикаты (заготовки) превращаются в готовую продукцию. Производственный

процесс включает в себя не только изготовление деталей и их сборку, но и транспортировку и хранение материалов и заготовок, изготовление технологической оснастки и др.

Производственный процесс включает все этапы, которые проходит природный материал на пути превращения его в изделие. На радиозаводе выполняется часть производственного процесса, поскольку завод получает полуфабрикаты в виде материалов и комплектующих изделий (лампы, микроэлементы, крепеж и др.). Производственный процесс на радиозаводе делится на ряд процессов, выполняемых в различных цехах (заготовительных, обработки и сборки).

Заготовка – полупродукт производства, из которого изменением формы, состояния поверхности и физических свойств исходного материала изготовляют деталь.

Технологический процесс – часть производственного процесса, содержащая действия по непосредственному изменению и последующему контролю состояния любого предмета производства (детали, узла РЭС, отдельного вида РЭС). Различают технологические процессы (ТП) изготовления деталей, сборки, настройки, регулировки, контроля изделия. Основу ТП изготовления деталей составляют действия направленного формирования радиотехнических, химических, механических и других свойств исходного материала заготовки. Технологический процесс представляет собой ту часть производственного процесса, во время которой изменяется качественное состояние объекта производства (детали, узла, РЭС). Это определение указывает на внешние системные связи ТП. С одной стороны, являясь частью производственного процесса, технологический процесс связан со структурой производства, с другой – со структурой и параметрами объектов производства. Причем для РЭС свойства объекта производства определяются конструкцией.

Этап технологического процесса – группа операций, выполняемых последовательно и имеющих признак общности. Например, этап подготовки поверхности корпуса устройства СВЧ под серебрение включает в себя несколько операций: обезжиривание, сушку, травление в гидроокиси натрия, промывку, осветление в растворе азотной кислоты и т.п. Группирование операций в этапы позволяет лаконично описать сложный ТП, состоящий из десятков и сотен операций.

В зависимости от вида процесса – обработки или сборки, покрытий, прессования, штамповки и пропитки – содержание и поня-

тие элементов операции изменяются. Наиболее четко они определены при механической обработке.

Согласно ГОСТ 3.1109–82 ЕСТПП технологический процесс состоит из операций, установок, позиций, переходов, рабочих ходов, приемов и элементов приемов, выполняемых на рабочих местах.

Рабочим местом называется часть производственной площади цеха, на котором размещены один или несколько исполнителей работы и обслуживаемая ими единица технологического оборудования, а также оснастка и предметы производства.

Технологическая операция – законченная часть технологического процесса, выполняется на одном рабочем месте, одним или группой рабочих (а также в условиях безлюдной технологии) непрерывно над определенной деталью (группой деталей) или сборочной единицей (несколькими сборочными единицами). Операция связана с выполнением законченного объема работы и является основным элементом производственного планирования и учета. Примерами операции могут служить штамповка крышки корпуса ИС, изготовление штырькового вывода, контроль магнитных свойств магнитопровода.

Отметим, что наименование операций записывается в форме прилагательного в именительном падеже (сверлильная, токарная и т.п.). Кроме технологических основных, различают вспомогательные операции. К ним относятся транспортировка деталей, маркировка, контроль и другие работы.

Функция технологической операции (ТО) заключается в количественном и качественном преобразовании свойств объекта производства. Формализованное описание ТО как основного элемента ТП на уровне переходов и приемов (одинаково пригодных для описания сборочно-монтажных, контрольных и настроечно-регулировочных операций) только с позиций описания их структуры не является полным и требует построения ряда математических моделей, определяющих режимы и параметры операций, в том числе:

- межоперационные размеры детали, поступающей на операцию, припуски, допуски на них;
- выбор схемы базирования и установки детали;
- формирование допустимых вариантов временной структуры операции, т.е. определение совокупности установок и переходов и их последовательности;

• расчет времени выполнения переходов и вспомогательных приемов в операции;

• определение норм времени, квалификации рабочего, расценок и себестоимости операций;

• определение рациональной (оптимальной) структуры технологической операции;

• выбор схемы установки и базирования, определение точности системы станок – приспособление – инструмент – деталь (СПИД), видов обрабатываемых поверхностей, в том числе поверхностей ориентации и установки, и требуемой точности обработки.

Исходной информацией для определения структуры операции (последовательности установок и переходов) является множество базовых поверхностей, определенных для всей совокупности обрабатываемых поверхностей детали.

Установ – часть технологической операции, выполняемая при неизменном закреплении обрабатываемых заготовок или собираемой сборочной единицы. В серийном и массовом производствах установы чаще всего выделяются в отдельные операции.

Позиция – фиксированное положение, занимаемое неизменно закрепленной обрабатываемой заготовкой или собираемой сборочной единицей совместно с приспособлением относительно инструмента или неподвижной части оборудования.

Технологический переход – законченная часть технологической операции, характеризуемая постоянством применяемого инструмента и поверхностей, образуемых обработкой или соединяемых при сборке.

Наименование переходов записывается в форме глаголов в неопределенной форме (точить, замерить и т.п.). Переход должен содержать точные и конкретные действия рабочего.

Переходы могут быть простыми и сложными. Под простым переходом понимают переход, осуществляемый над одной поверхностью детали. Функцией простого перехода в механообработке является перевод объекта производства из одного качественного состояния в другое. Вид преобразования перехода определяется его названием относительно классов технологогических операций и объектов производства по словарю названий переходов.

Рабочим ходом называется законченная часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инстру-

мента относительно заготовки, сопровождаемая изменением формы, размеров и других свойств заготовки.

Прием – законченное действие рабочего, использующееся для технического нормирования работ.

Приемом называется часть технологической операции или перехода, имеющая законченное целевое назначение. Функция приема определяет перевод системы СПИД из (i – 1)-го узлового состояния в другое i-е. Под узловым состоянием системы СПИД будем понимать совокупность значений переменных, характеризующих параметры системы СПИД в моменты времени окончания приема. К значениям переменных относятся: координаты положения инструмента, установочных головок, деталей, их размеры и технологические режимы (скорость резания, подача, глубина резания), обеспечивающие прием (подвод инструмента, отключить подачу и т.п.).

Элемент приема – это движение, поддающееся наблюдению (взять ключ, положить его и т.д.).

В соответствии с единой системой конструкторской документации (ЕСКД) изделием называется как простейшая деталь, так и сложное устройство, подлежащее изготовлению на данном предприятии.

Любое сложное изделие состоит из сборочных элементов, т.е. тех частей изделия, которые могут быть изготовлены и собраны независимо друг от друга. Каждый сборочный элемент состоит из деталей.

Деталь – это изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала без применения каких-либо сборочных операций. Если оборонный элемент образован двумя видами материалов, соединенных не методами механической сборки, или если форма одного материала всецело определяется конфигурацией другого материала, то такой сборочный элемент также является деталью, например, пластина из биметалла, посеребренная деталь и т.д.

Отдельной составной частью ЕСТПП является единая система технологической документации (ЕСТД). ЕСТД включает:

- единые этапы, виды и комплектацию технологических документов;
- методы и инструкции по применению заготовок, сборочных единиц и дополнительных устройств (приспособлений);

- систему обозначений технологической документации;
- нормативные справочные данные параметров станков;
- источники для составления и содержания нормативных карт данных.

ЕСТД устанавливает инструкции по разработке, оформлению, комплектованию и прохождению технологической документации, которая разрабатывается и применяется на всех станкостроительных и приборостроительных предприятиях.

1.2. Технологическая подготовка производства

Технологическая подготовка производства (ТПП) – это совокупность современных методов организации управления и решения технологических задач на основе комплексной стандартизации, автоматизации, экономико-математических моделей и средств технологического оснащения.

Под ТПП в общем случае понимается комплекс работ по обеспечению технологичности конструкции изделия, проектированию ТП и средств технологического оснащения, расчету технически обоснованных материальных и трудовых нормативов, потребного количества технологического оборудования и производственных площадей, внедрению ТП и управлению им в производстве, позволяющий приступить к выпуску нового изделия в заданных объемах.

Трудоемкость ТПП в значительной мере зависит от типа и вида производства, сложности изготавливаемого изделия, его технологической характеристики и организационно-технической структуры предприятия. В общем случае объем и содержание ТПП включают в себя:

- проведение всего комплекса работ по проектированию ТП;
- конструирование и изготовление технологической оснастки (приспособления, инструмент, нестандартное оборудование, средства механизации и автоматизации ТП);
- разработку технологии контроля и средств для его осуществления;
- установку и освоение нового оборудования;

- расчет норм расхода материала, рабочей силы, необходимых производственных площадей;
- проектирование внутрицехового и межцехового транспорта;
- разработку системы планирования производства.

Задачами ТПП являются:

1) отработка конструкции на технологичность.

Ведущие технологи ОГТ проводят технологический контроль конструкторской документации, оценку уровня технологичности конструкции, оценку снижения материальных и трудовых затрат;

2) прогнозирование развития технологии.

Изучение передового опыта, проведение лабораторных исследований по новым технологическим решениям – это дело технологического бюро ОГТ, лабораторий ОГТ;

3) стандартизация техпроцессов.

Группа типизации ТП ОГТ проводит анализ конструктивных особенностей деталей, сборочных единиц и их элементов, обобщение результатов анализа и подготовку рекомендаций по их стандартизации, разработку типовых ТП;

4) группирование ТП.

Определяет номенклатуру классификационных групп деталей, сборочных единиц, разработку групп новых ТП;

5) технологическое оснащение.

Унификация и стандартизация средств технического оснащения выявляют оригинальную технологическую оснастку, определяют потребность в универсальной таре;

6) оценка уровня технологии.

Устанавливают основные направления и пути повышения уровня технологии на предприятии;

7) организация и управление процессом ТПП.

Плановая группа ОГТ выявляет узкие места в ТПП, принимает решения по их ликвидации, осуществляет контроль за выполнением этапов работ по ТПП;

8) разработка ТП.

Разрабатывают новые и совершенствуют действующие единичные ТП, проводят корректировку ТП;

9) проектирование средств специального технического оснащения.

Выбирают специальное технологическое оборудование, а в случае отсутствия – разрабатывают ТЗ на проектирование специального инструмента, приспособлений, штампов, пресс-форм и т.д.;

10) разработка норм.

Стандарты ЕСТПП устанавливают общие правила организации и моделирования процесса управления производством, предусматривают широкое применение прогрессивных ТП, стандартной технологической оснастки и оборудования, средств механизации и автоматизации производственных процессов и инженерно-технических и управленческих работ.

Под ЕСТПП понимают комплекс правил и положений по организации и проведению ТПП на предприятиях при использовании новейших технологических, организационных, экономических познаний и технических средств.

1.3. Средства выполнения технологических процессов

Технологическое оборудование – это орудия производства, в которых размещают материалы или заготовки для выполнения технологических операций: станки, прессы, литейные машины, печи, вакуумные установки и т.д.

Технологическая оснастка – это орудия производства, добавленные к технологическому оборудованию, необходимые для выполнения технологических операций. Сюда относятся станочные приспособления, штампы, матрицы, пресс-формы, режущий и измерительный инструмент.

Наладка – это подготовка технологического оборудования и оснастки к выполнению определенной технологической операции.

Подладка – это дополнительная регулировка технологического оборудования и оснастки в процессе работы для восстановления достигнутых при наладке значений параметров, утраченных с течением времени.

Рассмотрим временные характеристики ТП.

Циклом технологической операции называется интервал календарного времени от начала до конца периодически повторяющихся технологических операций.

Такт выпуска – это интервал времени, через который периодически производится выпуск деталей определенного наименования.

Ритм выпуска – это количество деталей определенного наименования, выпускаемых в единицу времени.

Напомним, что ТПП обеспечивает полную технологическую готовность предприятия к производству изделия в соответствии с заданными технико-экономическими требованиями.

Основой деятельности технолога на предприятии являются:

- подготовка и проведение мероприятий по организации и управлению процессами ТПП;
- отладка производственных процессов изготовления новых изделий;
- разработка ТП на выпускаемые предприятием изделия;
- конструирование необходимой для их изготовления специальной технологической оснастки;
- разработка ТП на изготовление этой оснастки.

ТПП включает комплекс работ:

- отработка, анализ изделия на технологичность;
- проектирование перспективных ТП;
- проектирование элементов производственной системы;
- проектирование рабочих ТП.

Проектирование перспективных ТП распространяется на изделия, включенные в проектные объемы и программу выпуска, на основе совместного группирования как новых, так и ранее выпускавшихся изделий. **Перспективные ТП** используются как информационная основа для разработки новых ТП при техническом и организационном перевооружении производства. Проектирование элементов производственной системы состоит из следующих этапов:

- определение состава технологического оборудования по видам производства;
- формирование производственных подразделений;
- разработка технологической планировки производственных подразделений;
- определение специализации рабочих мест.

Определение состава технологического оборудования заключается в выборе моделей и определении количества прогрессивного технологического оборудования, необходимого для изготовления изделий, выпускаемых предприятием в планируемый интервал времени. Формирование производственных подразделений заключается в определении видов и количества производственных подразделений посредством распределения технологического оборудования, обеспечивающего оптимальную специализацию для данного типа производства.

Разработка технологической планировки производственных подразделений заключается в расстановке технологического оборудования с учетом формы организации ТП минимизации грузопотоков, применении эффективных средств транспортирования и складировании материалов, заготовок, производственных отходов. Проектирование ТП является одной из основных функций ТПП.

1.4. Требования ЕСТПП к технологическим процессам

Группа нормативов затрат обеспечивает разработку детальнооперационных норм затрат труда, что делает возможным применение технически обоснованных норм времени на выполнение операций, норм расхода топлива, энергетических, сырьевых ресурсов, комплектующих изделий на единицу продукции. Группа стоимостных нормативов осуществляет разработку подетальной стоимости затрат по цехам.

Совершенствование организации ТПП заключается в разработке подразделениями отдела главного технолога (ОГТ) руководящих материалов, положений, стандартов, организационно-методических документов и нормативов, регламентирующих функции ТПП.

ТПП производства РЭС должна содержать оптимальные решения не только задач обеспечения технологичности изделия, но и проведения изменений в системе производства, обусловленного последующим улучшением технологичности и повышением эффективности изделий. Поэтому современная ТПП сложных РЭС должна быть автоматизированной как органическая составная часть САПР.

В связи с быстрым освоением новых изделий в интересах развития народного хозяйства страны Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР Постановлением от 15 марта 1973 г. № 590 утвердил комплекс стандартов – «Единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП)».

ЕСТПП (ГОСТ 14.001–73) есть установленная государственными стандартами система организации и управления процессом технологической подготовки производства (ТПП), предусматривающая широкое применение прогрессивных типовых технологических процессов, стандартной технологической оснастки и оборудования, средств механизации и автоматизации производственных процессов, инженерно-технических и управленческих работ. Основное назначение – обеспечить:

- единый для всех предприятий и организаций системный подход к выбору и применению методов и средств ТПП;
- освоение производства и выпуска изделий высшей категории качества в минимальные сроки при минимальных трудовых и материальных затратах на ТПП;
- организацию производства высокой степени гибкости, допускающую возможность непрерывного его совершенствования и быстрой переналадки на выпуск новых изделий.

Комплекс стандартов ЕСТПП (класс 14) включает следующие группы стандартов:

0 – общие положения;

1 – правила организации и управления процессом технологической подготовки производства;

2 – правила обеспечения технологичности конструкции изделий;

3 – правила разработки и применения технологических процессов и средств технологического оснащения;

4 – правила применения технических средств механизации и автоматизации инженерно-технических работ;

5 – прочие стандарты.

Остановимся на некоторых вопросах, подлежащих учету при курсовом проектировании. ГОСТ 14.201–73 предусматривает общие правила отработки конструкции изделия на технологичность. Конструкции оценивают количественно системой показателей, которая включает базовые (исходные) показатели и показатели уровня технологичности (отношение показателей к базовым). В зависи-

мости от стадии разработки конструкторской документации таких показателей 22.

Разработка и оформление технологических документов – довольно трудоемкая часть общего комплекса работ по ТПП. Это объясняется наличием в производстве РЭС очень большой номенклатуры деталей и узлов и, следовательно, громадного количества обращающейся в производстве документации. Единые правила выполнения, оформления, комплектации и обращения технологической документации устанавливаются Единой системой технологической документации (ЕСТД), которая обеспечивает преемственность с Единой системой конструкторской документации (ЕСКД) и дает возможность обработки информации на ЭВМ, возможность организации взаимообмена технологических документов между предприятиями без переоформления.

ЕСТД устанавливает инструкции по разработке, оформлению, комплектованию и прохождению технологической документации, которая разрабатывается и применяется на всех станкостроительных и приборостроительных предприятиях.

ЕСТД включает:

- единые этапы, виды и комплектацию технологических документов;
- методы и инструкции по применению заготовок, сборочных единиц и дополнительных устройств (приспособлений);
- систему обозначений технологической документации;
- нормативные справочные данные параметров станков;
- источники для составления и содержания нормативных карт данных.

ГОСТ 14.302–73 и ГОСТ 14.303–73 обращают особое внимание на применение типовых технологических процессов и широкое использование ЭВМ. Правила разработки рабочих технологических процессов изложены в ГОСТ 14.311–75, а групповых – в ГОСТ 14 316–75.

Выбор технологического оборудования производится в соответствии с ГОСТ 14.301–73 и ГОСТ 14.304–73. В условиях мелкосерийного производства значительный эффект можно ожидать при использовании универсального оборудования. Применение различных приспособлений, приставок и дополнительных механизмов расширяет возможности станков и позволяет быстро перестроиться

на выпуск другого вида продукции. Стандарты ЕСТПП устанавливают общие правила организации и моделирования процесса управления производством, предусматривают широкое применение прогрессивных ТП, стандартной технологической оснастки и оборудования, средств механизации и автоматизации производственных процессов и инженерно-технических и управленческих работ.

Правила выбора технологической оснастки в ЕСТПП предусмотрены ГОСТ 14.305–73. В этом стандарте указан общий порядок выбора; внимание акцентируется на применении универсальной и сборно-разборной оснастки. В приложении к этому ГОСТу дается определение зон рентабельности применения различных систем станочных приспособлений. Применение универсальных видов технологической оснастки является одним из эффективных путей, сокращающих цикл ТПП.

Большое значение имеет обеспечение производства покупным инструментом. В ЕСТПП правила организации инструментального хозяйства предусмотрены ГОСТ 14.105–74, где указывается, что основными задачами инструментального хозяйства являются: определение потребности в инструменте, планирование, организация эксплуатации, технический надзор, обеспечение рабочих мест, а также учет и хранение.

Одной из важных работ в ТПП является составление ведомости норм расхода материалов. Основная трудность определения норм расхода материалов состоит в расчете подетальных норм. Сводные нормы составляют сумму подетальных по маркам, сортаменту и типоразмерам. При производстве РЭС часто стоимость материала значительно выше стоимости труда, затраченного на его переработку. Например, стоимость материала штампуемых деталей составляет 60–70 % от их общей стоимости изготовления, тогда как зарплата составляет 5–15 %. Правила расчета норм расхода материалов с помощью средств вычислительной техники приведены в ГОСТ 14.106–74. При автоматизированном решении задач по расчету норм расхода материалов используют информационные массивы и алгоритмы решения задач расчета норм в соответствии с формулами, приведенными в этом же стандарте.

Планирование ТПП ведется с учетом координации работы многих служб завода. При определении сроков выполнения работ за основу берутся конечные директивные сроки выпуска новых изделий, затем рассчитываются объемы работ по этапам в зависимости от трудоемкости, количества исполнителей, оригинальных де-

талей и т.д., после чего составляется сетевой график выполнения работ. Общая картина деятельности всех подразделений, занятых подготовкой производства, отражается схемой событий и работ. При построении сетевого графика используются вероятностные методы, при этом для каждого события определяется минимальное, вероятное и максимальное время выполнения, а для каждой работы – математическое ожидание и его дисперсия.

Основными задачами и целями внедрения ЕСТПП являются:

- повышение производительности труда технологов;
- сокращение сроков освоения;
- совершенствование методов подготовки производства путем рациональной организации в сочетании с механизированным и автоматизированным проведением инженерных работ;
- гарантирование более высокой гибкости изготовления в сочетании с повышением уровня специализации и кооперации предприятий;
- повышение уровня технического оснащения;
- решение все более сложных задач организации и управления производственным процессом.

ЕСТПП способствует непрерывному повышению уровня технологической подготовки и собственно изготовления во всей промышленности.

ЕСТПП включает в себя решение следующих функциональных задач:

- обеспечение технологичности конструкции изделий;
- разработку ТП;
- проектирование и изготовление средств технологического оснащения;
- организацию и управление ТПП.

Целью создания автоматизированной системы технологической подготовки производства (АСТПП) является ускорение и совершенствование технологической подготовки производства (ТПП) на базе математических методов, оптимизации процессов проектирования и управления с применением современных средств вычислительной и организационной техники. Системное использование средств автоматизации инженерно-технических работ обеспечивает оптимальное взаимодействие людей, машинных программ и техни-

ческих средств автоматизации при выполнении функций технологической подготовки производства. Разработка и внедрение АСТПП требуют наличия развитой стандартизации, нормализации и унификации конструкций и конструктивных элементов технологического оснащения, технологических процессов, вычислительной и организационной техники и ее математического обеспечения. АСТПП позволяет упорядочить и регламентировать все элементы ТПП, выполнять их на принципиально новой основе:

- подсистемы, проектирующие ТП, – на основе САПР Т;
- подсистемы, конструирующие специальное технологическое оснащение (СТО), – на основе САПР К;
- подсистемы управления ТПП – на основе АСУ;
- подсистемы изготовления специального технологического оборудования (СТО) – на базе АСУ гибких производственных систем (ГПС).

Экономический эффект от применения АСТПП получается как за счет снижения трудоемкости самого процесса проектирования, так и за счет использования резервов в технологических процессах (например, за счет повышения качества изделия; уменьшения расхода инструментов; уменьшения величины отходов; оптимизации принимаемых решений на раскрой материалов, на режимы обработки, распределение припусков и др.).

АСТПП должна (в общем случае) решать следующие задачи:

- отработка изделий РЭС на технологичность;
- диалоговое формирование ТП изготовления изделий;
- проектирование технологической оснастки и инструмента;
- проектирование элементов производственной системы;
- разработка управляющих технологических программ для оборудования с ЧПУ;
- разработка управляющих программ (циклограмм) для оборудования с программным управлением;
- обеспечение автоматизированного информационного обслуживания пользователей (поиск и выдача информации на микрофильмах пользователям; поиск и выдача информации ЭВМ; обеспечение пользователей сетью терминальных пунктов);
- осуществление автоматизированного управления технологической подготовкой производства ТПП (расчет планов ТПП, кон-

троль за выполнением планов, расчет нормативов, расчет норм и потребностей).

Для решения этих задач в АСТПП (в общем случае) имеются подсистемы общего назначения:

- поисково-информационная подсистема;
- подсистема формирования исходных данных для других автоматизированных систем и подсистем.

Глава 2

Основы построения технологических систем

2.1. Основные понятия и определения в теории и практике производственных технологий

В настоящее время наблюдается интенсивное развитие электронной и радиоэлектронной техники. Электронные и радиотехнические изделия находят все более широкое применение в материальном производстве, быту, медицине, биологии и многих других областях науки, техники и практической деятельности. Промышленное производство радиоэлектронной техники поднялось на более высокий научно-технический уровень и продолжает развиваться быстрыми темпами.

Технология РЭС – это наука, занимающаяся изучением закономерностей, действующих в процессе изготовления радиоэлектронных изделий, с целью использования этих закономерностей для обеспечения требуемого качества радиоаппаратуры и наименьшей ее себестоимости.

Технология – это инструмент создания искусственного мира. Она неизбежно оказывает экологическое давление на естественную среду обитания. Опасным это давление становится тогда, когда его интенсивность превышает восстановительный потенциал природы.

Технологией также называют науку, разрабатывающую эти нормы и способы и выявляющую наиболее эффективные и экономичные производственные процессы, требующие наименьших затрат времени и ресурсов. Технология РЭС – это наука о способах и процессах преобразования исходных материалов в изделие с требуемыми радиотехническими параметрами, сохраняющимися неизменными в течение заданного периода эксплуатации изделия. Технология РЭС занимается изучением закономерностей, проявляющихся в процессе изготовления РЭС, с целью использования этих закономерностей для обеспечения требуемого качества радиоаппаратуры и наименьшей ее себестоимости. В процессе разработки и изготовления РЭС проектировщику приходится решать целый комплекс вопросов, направленных на получение требуемых показате-

лей качества. При этом приходится учитывать как характеристики изготавливаемой аппаратуры, так и сам процесс производства в их взаимодействии. Наш курс систематизирует и углубляет ранее полученные знания и на основе их дальнейшего развития позволяет инженеру решать задачи в области создания современных высокопроизводительных и экономичных технологических процессов (ТП) изготовления РЭС.

Цель курса – изучение основ проектирования ТП изготовления РЭС, приобретение навыков проектирования ТП, ознакомление с принципами управления ТП и принципами их автоматизации, повышение эффективности и качества. Основная цель данного курса – научиться оптимизировать ТП, т.е. решать задачу выбора оптимального варианта ТП в соответствии с выбранным критерием оптимальности. Создание сложной РЭС требует комплексного решения на общей технической базе. Такой базой в настоящее время является комплексная миниатюризация с применением микроэлектроники, внедрением унификации и стандартизации.

В процессе разработки и изготовления РЭС проектировщику приходится решать целый комплекс вопросов, направленных на получение требуемых показателей качества. При этом необходимо учитывать как характеристики изготовляемой аппаратуры, так и сам процесс производства в их взаимодействии. Очевидно, что решение задач технологии невозможно без учета реальной структуры производства, взаимосвязей между отдельными ее частями, без учета случайных событий, действующих в процессе производства. Получение определенных результатов, выбор тех или иных соотношений в организационной структуре самого процесса производства и системы управления производством, анализ данных о ходе производственного процесса требуют привлечения многочисленных математических методов, результатов различных прикладных наук и проведения исследований.

Для изготовления РЭС необходим производственный процесс, в ходе которого осуществляется превращение полуфабрикатов в готовое изделие. Производственный процесс радиоэлектронного завода включает в свой состав получение заготовок, различные виды их обработки, контроль качества, транспортирование, хранение на складах, сборку, регулировку, испытание, отделку и упаковку, т.е. требует деятельности коллектива людей, направленной на получение определенного вида изделий с заданным качеством. Таким образом, можно рассматривать производство РЭС как большую сис-

тему, включающую в себя коллектив людей, объединенных в сложнейших по технологии и структуре взаимосвязей производственных процессах, работающих на современных аппаратах, станках, механизмах и машинах.

Взаимоотношения и взаимосвязи отдельных элементов и звеньев в подобной системе управления носят весьма сложный характер последовательного подчинения и основаны на обработке и обмене информацией. Выявление лучшей структуры управления и организации можно достичь с помощью математических методов анализа динамики сложных систем, включающей в свой состав такие разделы математики, как теория вероятностей, теория игр и статистических решений, теория информации, теория стохастической аппроксимации, линейное, динамическое и выпуклое программирование, теория массового обслуживания и математическое моделирование.

Решение вопросов обработки, включающей механическую, термическую, химическую и другие виды обработок, требует знания всех достижений в данных областях химии, физики, которые направлены на получение определенных свойств обрабатываемых деталей. Рассмотрение технологической точности производства РЭС ставит новые задачи по определению ошибок изготовления, анализу их и соответствующей корректировке технологического процесса.

Это в свою очередь требует применения новых методов измерения, построения оптимальных технологических процессов.

Таким образом, на успешное решение задач технологии направлены многочисленные разделы современной науки.

В связи с этим намечается ряд перспективных направлений развития технологии: это, во-первых, математическое абстрагирование, т.е. математическое описание всех звеньев технологического процесса с целью получения точных аналитических соотношений, определяющих их взаимосвязь, а также получение переходных характеристик отдельных звеньев (отмеченное позволит проанализировать технологический процесс с точки зрения оптимальности его построения); во-вторых, это активное использование цифровой вычислительной и аналоговой техники на всех этапах проектирования и изготовления РЭС, что включает активное автоматическое управление процессом производства, делает гибким технологический процесс и позволяет решать задачи перестройки технологических процессов.

При условии получения объективных оценок технологических процессов весьма важной и актуальной является задача типизации технологических процессов на основе унификации объектов производства. При этом большое значение имеет разработка радиоэлектронных устройств на твердом теле и на интегральных схемах.

Решение этих и других задач позволяет создать оптимальную структуру производственного процесса и его отдельных звеньев, получить такой производственный процесс, который наиболее гибко реагирует на изменения внешних условий и характеристик звеньев, а также перейти к созданию автоматизированных технологических процессов. Это существенно повышает техническую и экономическую эффективность, производительность, качество изделий. Из вышеизложенного следует, что решение задач технологии РЭС основано на большом количестве точных и прикладных наук, описывающих различные аспекты процесса создания РЭС, что позволяет считать технологию РЭС комплексной, синтезирующей наукой.

При изготовлении деталей и их сборке используются различные физические и химические процессы, поскольку изменяются свойства материалов, форма заготовки, размеры, качество поверхностного слоя, относительное положение деталей и осуществляется их соединение, выполняются элементы микрорадиоэлектроники, достигаются заданные параметры узла и РЭС. Технология РЭС изучает использование различных процессов (физических, химических и др.) в данной конкретной производственной обстановке для получения высококачественного РЭС при минимальных затратах овеществленного и живого труда в заданных количествах, в установленное календарное время (в год, квартал, месяц, неделю, сутки).

В современном производстве РЭС можно выделить следующие основные технологические структуры: ТП структурообразования, направленные на формирование физической структуры электрорадиоэлементов (ЭРЭ), микросхем общего и частного применения; ТП формообразования, направленные на получение из заготовок деталей определенной формы, чаще всего выполняющих роль несущих конструкций; а также ТП сборки и монтажа, направленные на создание сборочных единиц и изделий.

Разработка и совершенствование того или иного варианта технологического процесса сопутствуют в явном или неявном виде всему ходу создания РЭС, начиная от составления технического задания и кончая его серийным или массовым выпуском. Исходя из

задач того или иного этапа проектирования или производства определяют разный уровень значимости технологических задач. Процесс производства РЭС в свою очередь можно условно разделить на три вполне самостоятельных этапа:

1) изготовление деталей, входящих в состав радиоаппарата;

2) монтаж и сборка всех деталей в узлы, блоки и РЭС в целом;

3) регулировка и доводка РЭС по параметрам до уровня, определяемого заданными техническими условиями и соответствующей технической документацией.

Каждый этап производства РЭС включает шесть стадий разработки:

1) подготовительную, состоящую из анализа технического задания на изделие или пробных процессов и подборки материала для проектирования;

2) эскизное проектирование;

3) техническое проектирование;

4) опытное производство;

5) выполнение установочной серии;

6) серийное или массовое производство.

Рассмотрим значимость стадий разработки на этапах производства.

В основе этапа изготовления деталей, входящих в состав РЭС, лежит воспроизведение требуемых характеристик путем изменения физико-химических свойств заготовки.

Процесс изменения физико-химических свойств заготовки в широком смысле слова заключается в преобразовании первоначальных характеристик заготовки, полуфабриката или изделия физическими или химическими методами обработки; завершается он созданием новой номенклатурной единицы.

Изготовленные детали или узлы собираются и монтируются далее в единое РЭС, которое полностью отвечает заданным принципиальным схемам и конструкторской документации. Непосредственно после сборки параметры РЭС при его функционировании практически всегда отличаются от электрических параметров, заданных техническими условиями. Лишь при серийном или массовом производстве относительно простых РЭС иногда не требуется проведения дополнительных регулировочных работ.

Регулировочные работы являются завершающими в производстве РЭС и преследуют цель корректировки электрических и меха-

нических параметров путем применения тех или иных физико-химических процессов, обеспечивающих заданные техническими условиями характеристики РЭС.

Комплексно-статическое представление технологического процесса позволяет технологу правильно поставить только задачу проектирования процесса в более или менее обычном виде. Детальная же разработка технологического процесса производства РЭС может быть осуществлена лишь на основе изучения динамической взаимосвязи всех его звеньев. Рассмотрение динамического взаимодействия отдельных узлов и систем РЭС требует привлечения количественного математического описания как самого объекта производства, так и технологического процесса, т.е. задания уже определенных точностных и других характеристик процесса производства.

РЭС представляет собой совокупность элементов, объединенных в сборочные единицы и устройства и предназначенных для преобразования и обработки электромагнитных сигналов в диапазоне частот колебаний от инфракрасных до сверхвысоких. Элементы, рассчитанные на совместную работу в РЭС, различают по функциональным, физическим, конструктивно-технологическим признакам и типам связей.

По функциональным признакам элементы РЭС делят в зависимости от тех функций (задач), для выполнения которых они предназначены, например, сопротивление, емкость, индуктивность.

По физическим признакам элементы РЭС различают в зависимости от физических явлений и законов, положенных в основу их функционирования, например, электростатические или динамические элементы.

По конструктивно-технологическому признаку элементы РЭС делят в зависимости от их конструкции и технологии изготовления на дискретные и интегральные, которые объединяют в сборочные единицы, выполняющие элементарные действия (например, генератор, усилитель, счетчик).

По типам связей элементы РЭС делят в зависимости от вида связи между ними в РЭС, например, постоянная связь (проводная), связь с помощью электромагнитного поля (индуктивная).

В зависимости от диапазона рабочих частот РЭС меняются как активные, так и пассивные элементы, использующиеся в РЭС. Например, в диапазоне средних и низких частот используются индуктивности и емкости с сосредоточенными параметрами, которые могут быть изготовлены по любой известной технологии, а в диапазоне СВЧ – с распределенными параметрами, например, двухпроводные, полосковые линии и коаксиальные радиаторы.

Важными факторами, определяющими конструктивно-технологические особенности любой РЭС, являются ее конструктивное оформление и технология изготовления. Например, конструктивное оформление в виде самостоятельного устройства или встроенного модуля, технология сборки пайкой или механическое соединение, что существенно сказывается на эксплуатационных и производственных характеристиках РЭС. При конструктивно-технологическом анализе РЭС большое внимание следует уделять ее непосредственному назначению и условиям эксплуатации, которые сказываются на выборе технологии производства и конструктивного оформления. Например, наличие механических вибраций при эксплуатации требует применения более надежных методов сборки. Объективной тенденцией совершенствования конструкций РЭС является постоянный рост ее сложности ввиду расширения выполняемых функций и повышения требований к эффективности ее работы.

Конструктивно-технологические особенности РЭС включают функционально-узловой принцип конструирования, технологичность, минимальные габаритно-массовые показатели, ремонтопригодность, защиту от внешних воздействий, надежность (вероятность безотказной работы, среднее время наработки на отказ, среднее время восстановления работоспособности, долговечность и т.д.).

Сущность функционально-узлового принципа конструирования РЭС заключается в объединении функционально законченных схем в сборочные единицы и их модульной компоновке.

2.2. Иерархический подход в конструировании и технологии радиоэлектронных средств

Анализ и само представление о сложном предмете при анализе расчленяются на уровни. На высшем уровне используется наименее детализованное представление, отражающее только самые общие черты и особенности анализируемой системы. На каждом новом последовательном уровне разработки степень подробности рассмотрения возрастает, при этом система рассматривается не в целом, а отдельными блоками. Такой подход (называемый блочно-иерархическим) позволяет на каждом уровне формулировать и решать задачи приемлемой сложности, поддающиеся уяснению и пониманию одним человеком. Разбиение на уровни должно быть таким, чтобы документация на блок данного уровня была бы обозрима и воспринимаема одним человеком.

Преимущества блочно-иерархического подхода состоят в том, что сложная задача большой размерности разбивается на последо-

вательно решаемые задачи малой размерности. Недостатки блочно-иерархического подхода вытекают из того обстоятельства, что на каждом уровне работа ведется с не определенными до конца объектами. Следовательно, решения принимаются в обстановке неполной информации, без строгого обоснования. Оптимальность может быть достигнута только на отдельных уровнях при ограничивающих условиях, вытекающих из природы блочно-иерархического подхода. Однако в целом какой-либо удачной альтернативы блочно-иерархическому подходу нет, и приходится соглашаться на возможные отклонения от оптимальных вариантов. Существующее по ЕСКД деление схем на принципиальные, функциональные и структурные отражает принципы блочно-иерархического проектирования.

При проектировании ЭВМ существует деление на иерархические уровни: логический элемент, функциональный логический элемент, функциональное устройство, функциональный комплекс (рис. 1).

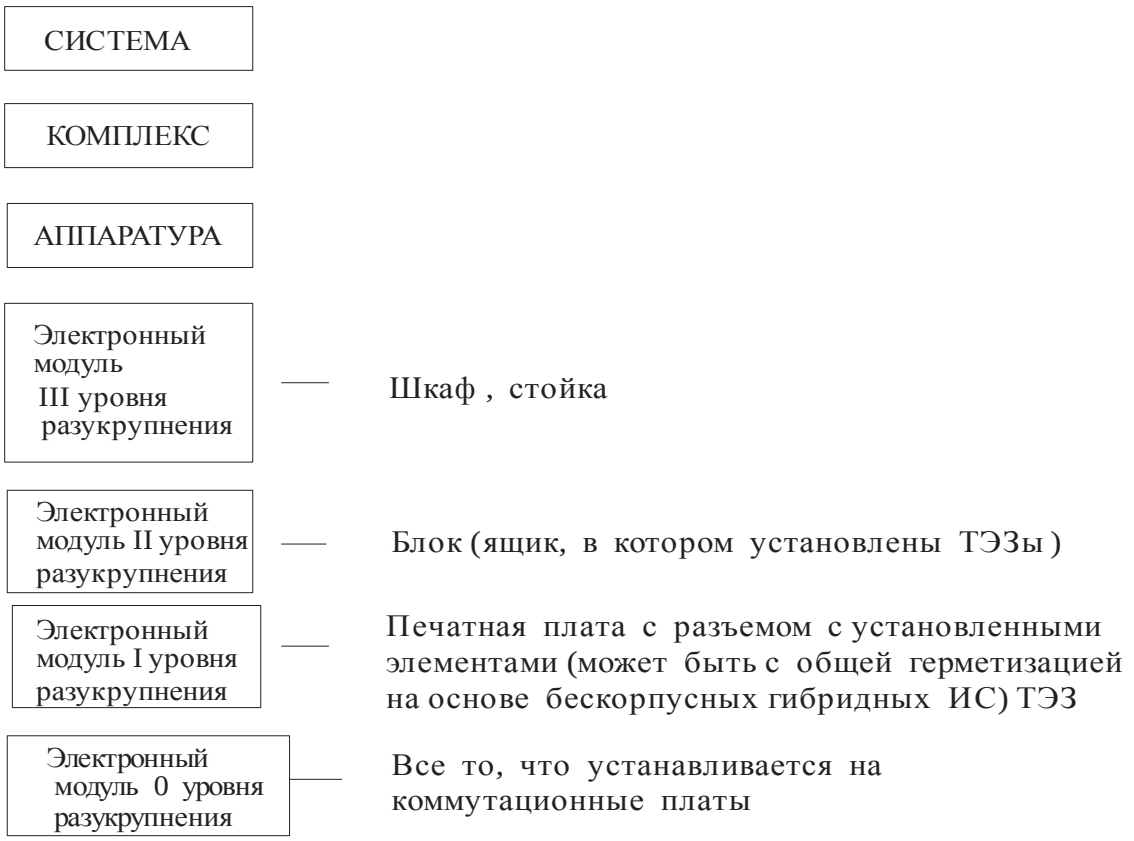


Рис. 1. Уровни разукрупнения РЭС

Конструкторская иерархия не всегда совпадает с функциональной – в конструкциях ЭВМ различают следующие уровни: стойка, состоящая из рам и дополнительных устройств типа блоков

питания и систем охлаждения; конструирование рамы, состоящей из панелей; панели, состоящие из типовых элементов замены (ТЭЗ) и ТЭЗов, элементами которых являются модули.

Базовые конструкции аппаратуры имеют несколько уровней модульности, предусматривающих объединение простых модулей в более сложные.

Модули 1-го уровня – интегральные микросхемы (ИМС) и дискретные электрорадиоэлементы (сопротивления, конденсаторы, транзисторы и т.д.).

Модули 2-го уровня – типовые элементы сборки (ТЭС) или ячейки, типовые элементы замены, печатные платы, которые конструктивно и электрически объединяют ИС и ЭРЭ.

Модули 3-го уровня – блоки (панели), которые с помощью плат и каркасов объединяют ячейки в конструктивный узел.

Модули 4-го уровня – рама (конструктивный узел – каркас рамы), которая объединяет блоки в единое целое.

Модули 5-го уровня – стойка (конструктивный узел – каркас стойки), которая может объединять несколько рам в единое целое.

Модули 6-го уровня – устройства.

В технологии РЭС принята следующая системотехническая иерархия (см. рис. 1).

Три нижних уровня разукрупнения могут быть основаны на единой унифицированной базе несущей конструкции (УБНК) – ряд корпусных типоразмеров. Примером иерархических уровней в технологии могут быть:

- маршрутная технология;
- операционная технология;
- инструмент и оснастка.

Отметим, что при построении моделей сложных систем на каждом иерархическом уровне используются свои математические модели, сложность которых согласована с возможностями анализа.

Технология должна обеспечивать заданные свойства изделия так же, как качество отдельной детали или изделия – совокупность свойств, обусловливающих способность отвечать определенным требованиям в соответствии с ее назначением. Основными показателями качества изготовленных изделий являются точность сформированных физических свойств, выполненных размеров и формы элементов деталей, надежность. Степень приближения действительных значений параметров, формируемых при изготовлении детали, к их заданному значению называется точностью изготовления. Точность изготовления обеспечивается выбором методов обработки, построением техпроцесса.

Эффективность – способность системы функционировать во всем диапазоне возможных изменений режимов и установленных предельных значений изменения ее выходных параметров. Ее оценивают по четырем группам показателей:

1) технологическим (например, количество продукции в единицу времени);

2) организационным (например, трудовые затраты);

3) экономическим (экономические результаты деятельности, например, прибыль);

4) комплексным (одновременно по нескольким показателям).

Надежность – свойство системы выполнять заданные функции, сохраняя эксплуатационные показатели в допустимых пределах в течение требуемого промежутка времени. Надежность – это свойство РЭС сохранять во времени в установленных пределах значения всех требуемых характеристик, параметров и показателей при заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки. Надежность характеризуется безотказностью, ремонтопригодностью, сохраняемостью и долговечностью. Количественные характеристики этих показателей имеют вероятностный характер.

Безотказность – свойство изделия сохранять работоспособность в течение некоторой наработки без вынужденных перерывов.

Ремонтопригодность – свойство изделия, характеризующее его приспособленность к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путем проведения техобслуживания и ремонта.

Сохраняемость – свойство изделия сохранять обусловленные эксплуатационные показатели в течение и после заданного срока хранения и транспортирования.

Долговечность – свойство изделия длительно сохранять работоспособность в определенных режимах и условиях эксплуатации до разрушения или другого предельного состояния. Долговечность количественно оценивается техническим ресурсом или числом циклов работы.

В данном курсе будем изучать ТП сборки и электромонтажа РЭС, методику проектирования процессов, рассмотрим методы управления ТД и способы достижения оптимальных значений показателей эффективности, а также технологическое оборудование основных операций ТП и некоторые виды технологической оснастки. Кратко остановимся на вопросах контроля, регулировки, защиты РЭС от воздействия внешних условий.

К типовым ТП изготовления РЭС относятся:

1) входной контроль комплектующих ЭРЭ;
2) технологическая тренировка деталей и узлов;
3) сборка;
4) электрический монтаж;
5) технический контроль монтажа и сборки;
6) защита изделий от влияния внешней среды;
7) технологическая тренировка изделия;
8) регулировка (настройка) изделия;
9) испытания изделия;
10) выходной контроль.

Основными направлениями изучения данного курса являются сборка и электрический монтаж, определяющие до 80 % трудоемкости всего изделия. Но прежде чем приступить к их изучению, следует рассмотреть особенности РЭС.

2.3. Особенности радиоэлектронных средств

В современном промышленном производстве изготовление РЭС является одним из наиболее сложных процессов. Это вызвано многими причинами: большим числом специфических требований, предъявляемых к деталям, сборочным единицам, блокам и РЭС в целом. Например, к изделиям машиностроительной промышленности предъявляются требования по точности, прочности и определенной шероховатости поверхности деталей. При изготовлении РЭС наряду с механической обработкой широко применяют многие виды литья, холодной штамповки, прессования пластмасс и металлических порошков, различные виды химической, электрохимической, электроискровой, химико-термической, ультразвуковой, лазерной, электронно-ионной и других видов обработки.

Наличие большого количества сборочных единиц и высокие требования, предъявляемые к их точности, вызывают необходимость тщательного расчета размерных цепей и обоснования применяемых в производстве принципов компенсации погрешностей изготовления. Большое количество деталей и сборочных единиц РЭС требует не только размерной, но и функциональной взаимозаменяемости. Поэтому в процессе изготовления деталей, при монтажных и сборочных работах приходится предусматривать многочисленные операции по контролю, испытаниям и наладке. Условия эксплуатации РЭС разнообразны и характеризуются в основном климатическими и механическими воздействиями. Качество работы РЭС зависит также от степени влажности воздуха, проникновение влаги в печатные платы приводит к интенсивному окислению пе-

чатных проводников и уменьшению их сечения, что вызывает возрастание сопротивления. Пыль также опасна, так как способствует развитию коррозии и ускоряет износ трущихся частей. Поэтому требований, предъявляемых к изделиям радиотехнической промышленности, в несколько раз больше: те же требования, что и в машиностроении, плюс специфические требования к электропроводности, диэлектрическим, магнитным, пьезоэлектрическим, акустическим, оптическим свойствам, габаритам, массе, надежности, потребляемой мощности, защите от жестких климатических воздействий и т.д. Представляют интерес эти требования в виде диаграммы, изображенной на рис. 2.



Рис. 2. Особенности РЭС с точки зрения ее производства

На рис. 2 условно показаны требования, предъявляемые к изделиям машиностроения и к радиоэлектронным средствам. Если основные требования, предъявляемые (весьма условно) для велосипеда, – это точность, прочность и шероховатость, то эти же требования предъявляются и к радиоэлектронным изделиям (те же антенные системы, раскрывы которых достигают весьма внушительных размеров).

Требования по габаритам, массе, надежности мы осознанно вынесли в левую половину диаграммы, так как снижение массогабаритных размеров РЭС является сверхактуальной проблемой, и РЭС (авионика самолета) должна занимать как можно меньше места и иметь минимальную массу, чтобы не являться «бесполезной» нагрузкой самолета, снижающей его грузоподъемность.

Что касается надежности, то, естественно, надежной должна быть любая техника, но поскольку РЭС стоят в системах жизнеобеспечения человека, то это требование более насущно в РЭС.

Одним из основных аспектов является потребляемая мощность, снижение которой более существенно для РЭС, поскольку, кроме простого снижения энергопотребления, очень актуальна борьба с перегревом аппаратуры, вызванным отводом тепла с очень малых поверхностей и/или объемов.

Защита от жестких климатических воздействий также относится к важнейшим технологиям производства РЭС, так как, кроме традиционной влаги и тепла, для РЭС необходимы защита от электрических, магнитных, радиационных полей, обеспечение электромагнитной совместимости, защита от росы, тумана и т.д.

Вывод по рис. 2 однозначен – технология производства РЭС является наиболее сложной по сравнению с другими отраслями, сложна настолько, что не удается обеспечить автоматизированную сборку РЭС, существенно снизить долю ручного труда при ее производстве.

2.4. Технология радиоэлектронных средств как сложная система

Современный радиозавод представляет собой сложную структуру, состоящую из большого числа взаимосвязанных элементов, целью которой является производство высококачественной РЭС в необходимом количестве в заданные сроки при минимальных затратах.

Подобные структуры принято называть сложными (или большими) системами. Сложная система – это взаимодействующая совокупность многих элементов, предназначенная для выполнения единой цели, имеющая иерархическую структуру и управление.

Эффективно управлять такими системами старыми методами на основе человеческой интуиции невозможно. Это приводит к необходимости применения автоматизированных систем управления (АСУТП) и автоматизированных (или даже автоматических) систем управления ТП с использованием ЭВМ.

Системой называется целостная совокупность элементов, настолько тесно связанных между собой, что она выступает по отношению к другим системам и окружающей среде как нечто единое целое. Во всякой системе связь между ее составляющими элементами должна быть гораздо более прочной и устойчивой, чем связь каждого из этих элементов с частями других систем.

Системный подход определяет управление предприятием как систему, т.е. совокупность подсистем и элементов, находящихся между собой в сложной взаимосвязи и образующих единое целое.

Системный подход – это методология решения сложных производственных проблем, связанных с нахождением оптимальных вариантов управленческих воздействий в условиях неопределенности системы и неполноты информации о ней.

Сущность системного анализа состоит в установлении всех взаимосвязей между переменными факторами и определении их влияния на поведение всего комплекса как единого целого, причем соблюдается принцип иерархии критериев, задач и структуры.

Промышленное предприятие можно рассматривать с различных точек зрения: как самостоятельную первичную ячейку сферы материального производства, как экономическую систему, как социальную организацию и как объект управления. В качестве объекта управления предприятие представляет собой систему и изучается с позиций системного подхода. Предприятие как объект управления является особо сложной вероятностной системой, так как количество элементов и связей между ними чрезвычайно велико и поведение отдельных элементов не может быть точно предсказано. Система управления является иерархической (многоуровневой), в ее структуре есть подсистемы различных уровней, находящихся между собой в соподчиненных соотношениях. Свойство делимости СУ позволяет вычленить отдельные элементы и подсистемы, устанавливать их связь с другими элементами, что особо важно при моделировании управленческих процессов. Простейшим делением СУ является выделение управляющей и управляемой подсистем. Иерархическое построение системы обеспечивает повышенную устойчивость к внешним воздействиям, способствует локализации конфликтов и согласует локальные цели элементов и подсистем с общими целями всей системы. Иерархическое строение имеет и сам объект управления – предприятие.

Свойство иерархичности предполагает также, что каждая система входит как составная часть в систему более высокого уровня, а ее части могут рассматриваться и изучаться как самостоятельные системы. СУ производством обладает качеством множественности (поведение или состояние ее элементов отличается от поведения или состояния всей системы в целом, а совокупность свойств отдельных элементов не составляет общего свойства всей системы). Например, ни один из цехов не может выпустить продукцию, изготавливаемую всем предприятием.

Рассмотрение технологического процесса как сложной системы позволяет решать вопросы, связанные с математическим описа-

нием процесса и выбором его оптимальных характеристик. Следует считать технологический процесс сложной системой в том случае, когда в силу свойств и по характеру задач, возникающих при его исследовании, необходимо принимать во внимание наличие в процессе большого количества взаимосвязанных и взаимодействующих между собой элементов, обеспечивающих выполнение некоторой достаточно сложной функции.

Обращаясь к производственному комплексу для поточного производства РЭС, можно видеть, что он состоит из большого количества станков, обеспечивающих выполнение технологических операций (обработка деталей, сборка изделий или узлов). Отдельные станки могут объединяться в технологические линии общей сборки, на которых изделия собираются из отдельных деталей и узлов. Если некоторые узлы должны быть изготовлены в рамках рассматриваемого производственного процесса, то существуют соответствующие линии сборки узлов из отдельных деталей. Для деталей, изготовление которых входит в данный производственный процесс, существуют линии обработки, выполняющие последовательность операций, обеспечивающую производство этих деталей. Работа станков, линий и процесс в целом характеризуются частичной или полной синхронизацией, обеспечивают ту или иную степень взаимозаменяемости изделий при стабильности условий и режимов выполнения операций. В производственный процесс, помимо технологических операций, обычно включаются некоторые нетехнологические производственные операции: транспортировка полуфабрикатов, проверка качества, смазка, упаковка и т.п.

Средства автоматического или автоматизированного управления производственным процессом (соответствующие датчики, линии передачи данных, счетно-решающие или вычислительные устройства) собирают и обрабатывают информацию о состоянии полуфабрикатов и производственного оборудования и вырабатывают управляющие команды.

Как видно, технологический процесс состоит из большого количества взаимосвязанных элементов. Понятие элемента системы и расчленения системы на элементы с практической точки зрения представляется весьма относительным. Если рассматривать в качестве сложной системы производственный комплекс радиоэлектронного предприятия, то можно считать его элементами производственные комплексы отдельных цехов или отдельные технологические линии. Если же сложной системой служит технологическая линия, то элементами можно считать отдельные станки, агрегаты и прочие механизмы.

Контуры управления для радиоэлектронных производственных комплексов являются замкнутыми и обычно имеют обратную связь: фактическое значение регулируемого параметра сравнивается со значением этого параметра, требуемым программой управления; отклонение от программы служит основанием для выработки корректирующих сигналов – управляющей информации. Применение принципа обратной связи является одним из путей исключения грубых ошибок при реализации технологического процесса.

Производственный процесс изготовления РЭС, оснащенный средствами механизации, автоматизации управления производственными операциями и технологическими циклами, может служить примером сложной системы, обобщенная функциональная схема которой представлена на рис. 3. Здесь под A_i следует понимать физико-химический процесс производства i-й детали данного радиоэлектронного аппарата, под B_i – сборочно-монтажный технологический процесс сборки i-го узла блока. Под C_i следует понимать регулировочные процессы, производимые над i-м узлом блока данного РЭС. Переменными (f_k), влияющими на технологический процесс, могут служить материалы, комплектующие изделия, энергия, необходимая для осуществления данного технологического процесса, люди, осуществляющие этот технологический процесс, и т.п.

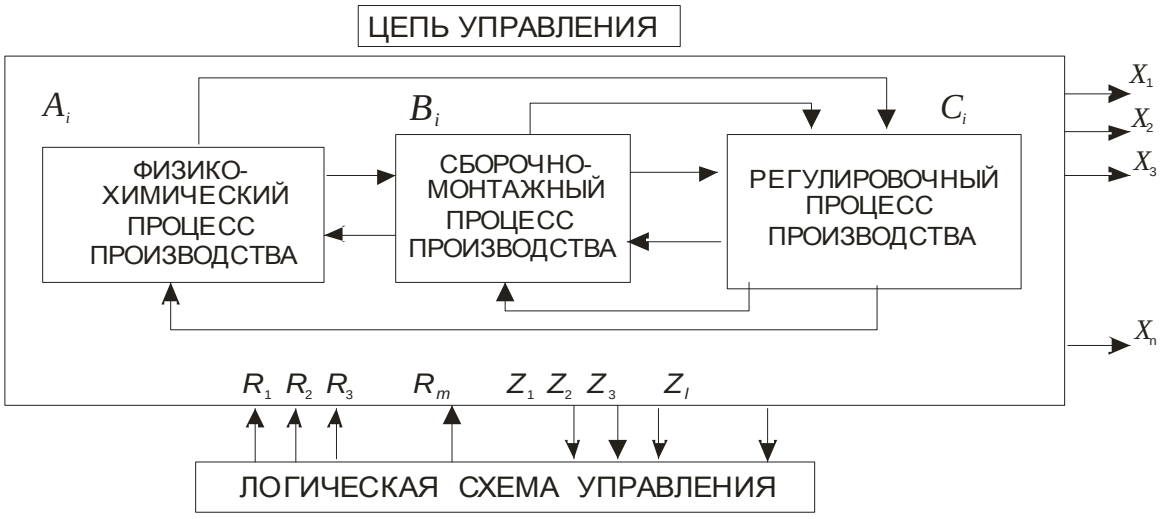


Рис. 3. Обобщенная функциональная схема производственного процесса изготовления РЭС

Рассмотрим обобщенную методику математического описания технологического процесса производства РЭС и методику выбора параметров отдельных звеньев системы управления технологическим процессом с точки зрения получения экстремальных зна-

чений целевой функции. Технологический процесс можно рассматривать как систему, состоящую из управляемой и управляющей систем. При этом под управляемой системой понимают совокупность нескольких управляемых объектов, объединенных единством цели управления. Совокупность средств, стремящихся обеспечить выполнение управляемой системой определенной цели, является управляющей системой.

Поведение всякой системы управления определяется: целью управления, окружающей обстановкой или внешними и внутренними условиями, т.е. свойствами управляемой и управляющей систем.

Выходные переменные X_n, характеризующие РЭС после технологического процесса производства, могут представлять собой такие параметры прибора, как его стоимость, надежность работы, точность, простота конструкции, удобство эксплуатации и многие другие.

Логическая система управления технологическим процессом производства РЭС служит для создания таких управляющих сигналов r_m, которые изменяют характеристики технологического процесса таким образом, что обеспечивается достижение некоторой целевой функции, являющейся комплексным показателем характеристик аппарата, выпускаемого при данном технологическом процессе.

Примерами логической системы управления могут служить человек, осуществляющий технологический процесс (самый простой случай), или система управления современного радиоэлектронного завода (директор, начальники цехов, технологи и т.д.). В более сложном случае автоматического технологического процесса логическое управление осуществляется логическим устройством или ЭВМ.

Управляющими сигналами r_m могут быть конкретные значения параметров, характеризующих данный технологический процесс производства (состав специалистов, снабжение комплектующими изделиями, состояние и особенности транспортировки и т.п.).

Под целевой функцией понимается обобщенный показатель системы, всесторонне характеризующий объект производства.

Управляемые системы и объекты можно характеризовать следующими группами переменных: переменными состояния $x_1(t), x_2(t),..., x_n(t)$, представляющими собой их обобщенные координаты; управляющими переменными $r_1(t), r_2(t),..., r_m(t)$, представляющими собой воздействия на управляемый объект, создаваемые управляющей системой; внешними переменными или возмущающими воздействиями $f_1(t), f_2(t),..., f_k(t)$, создаваемыми окружаю-

щей средой (внешние условия); наблюдаемыми переменными $z_1(t), z_2(t),..., z_l(t)$, представляющими собой те из обобщенных координат управляемой системы, сведения об изменении которых поступают на управляющую систему. Наблюдаемыми и переменными, в частности, могут быть переменные состояния $x_i(t)$.

Если рассматривать эти переменные как компоненты многомерных векторов, то они выразятся так:

$$\vec{x}(t) = \begin{vmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ ... \\ x_n(t) \end{vmatrix}; \quad \vec{r}(t) = \begin{vmatrix} r_1(t) \\ r_2(t) \\ ... \\ r_m(t) \end{vmatrix};$$

$$\vec{f}(t) = \begin{vmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ ... \\ f_k(t) \end{vmatrix}; \; \vec{z}(t) = \begin{vmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \\ ... \\ z_l(t) \end{vmatrix}, \tag{1}$$

где векторы: $\vec{x}(t)$ – состояния; $\vec{r}(t)$ – управления; $\vec{f}(t)$ – возмущения и $\vec{z}(t)$ – наблюдения.

В дальнейшем для упрощения предполагается, что вектор состояния совпадает с вектором наблюдения.

В любой момент времени t состояние управляемой системы является функцией начального состояния $x(t_0)$, векторов $\vec{r}(t_0)$ и $\vec{f}(t_0)$, т.е.

$$\vec{x}(t) = \vec{X}\{\vec{x}(t); \vec{r}(t,t_0); \vec{f}(t,t_0)\}. \tag{2}$$

Уравнение (2) можно рассматривать как уравнение математической модели управляемой системы. Для систем, описываемых дифференциальными уравнениями, написанные выше уравнения можно привести к виду

$$\frac{dx}{dt} = \vec{X}\{\vec{x}(t); \vec{r}(t); \vec{f}(t)\}. \tag{3}$$

Часто на изменение вектора состояния $\vec{x}(t)$ (или на его производные) и вектора управления $\vec{r}(t)$ накладываются ограничения вида

$$\left.\begin{array}{l}\vec{x}(t)\in \vec{A}(t),\\ \vec{r}(t)\in \vec{B}(t)\end{array}\right\}, \qquad (4)$$

которые означают, что изменения векторов $\vec{x}(t)$ и $\vec{r}(t)$ должны быть ограничены замкнутыми областями $\vec{A}(t)$ и $\vec{B}(t)$, соответственно векторного пространства состояний и векторного пространства управлений.

Так как технологический процесс представляется как совокупность действий его звеньев, подчиненных решению единой цели, определяемой экстремумом некоторого функционала E, то справедливо уравнение

$$E = E\{\vec{x}(t); \vec{r}(t); \vec{f}(t)\}. \qquad (5)$$

Рассмотрим вопросы описания целей функционирования звеньев технологического процесса.

Существенное значение приобретают полнота, четкость описания цели функционирования сложной системы и перечень решаемых ею задач. Если цели и задачи системы определены, можно ставить вопрос об оценке качества ее функционирования. Качество функционирования сложной системы будем оценивать с помощью показателей эффективности. Под показателем эффективности технологического процесса будем понимать такую числовую характеристику системы, которая оценивает степень приспособленности системы к выполнению поставленных перед ней задач. По существу выбор показателя эффективности является заключительной стадией формулировки целей и задач процесса. Без указания показателя эффективности формулировка целей и задач не приобретает необходимой четкости. Вместе с тем целесообразно подчеркнуть, что выбор показателя эффективности оказывает существенное влияние на интерпретацию свойств технологического процесса и результатов его исследования.

Рассмотрим некоторый производственный процесс. При описании целей и задач необходимо указать перечень изделий, для выпуска которых он предназначен. Однако если мы ограничимся только упомянутым перечнем, то не получим нужных сведений для обоснованной оценки качества функционирования процесса. Пусть показателем эффективности рассматриваемого производственного процесса служит производительность, измеряемая количеством изделий, выпускаемых в течение фиксированного интервала времени. Оценивая качество производственного процесса с помощью этого критерия, будем придавать наиболее существенное значение факторам, способствующим достижению максимальной производи-

тельности. При одностороннем подходе обеспечение максимальной производительности будет неизбежно сочетаться с ухудшением других характеристик производственного процесса (расхода сырья, износа оборудования, расхода энергии, фонда зарплаты и т.п.).

Аналогичные рассуждения можно привести и для других показателей эффективности. Например, при использовании в качестве показателя эффективности величины себестоимости продукции такие факторы, как экономия сырья, износ оборудования, расход энергии и фонда зарплаты, будут иметь больший вес, в то время как факторы, связанные с производительностью оборудования, отойдут на второй план.

Очевидно, что для производственного процесса надо выбирать такие показатели эффективности, которые учитывают себестоимость продукции, производительность оборудования, величину прибыли, рентабельность и др.

Из рассмотренных примеров ясно, что только выбор показателя эффективности (целей функционирования) для динамического технологического процесса делает описание целей и задач вполне законченным.

Расчет показателей эффективности для технологического процесса представляет собой весьма сложную задачу, которая требует привлечения специальных математических методов и, как правило, решается с помощью быстродействующих вычислительных машин.

Для того чтобы показатель эффективности достаточно полно характеризовал качество процесса, он должен учитывать все основные особенности и свойства последнего, а также условия его функционирования и взаимодействие с внешней средой. Таким образом, показатель эффективности определяется функционированием технологического процесса. С этой точки зрения можно представить себе множество возможных процессов, элементы которого отличаются друг от друга за счет различных условий и режимов работы системы.

Каждому элементу этого множества можно поставить в соответствие элемент другого множества – значения показателя эффективности процесса, т.е. показатель эффективности является функционалом от характера осуществления технологического процесса.

В связи с тем, что на технологический процесс воздействуют случайные факторы, значения функционалов оказываются случайными величинами. Это создает известные неудобства при использовании их в качестве показателей эффективности. Поэтому при выборе показателей эффективности пользуются средними значениями соответствующих функционалов, например, средним количе-

ством изделий, выпускаемых за смену, себестоимостью продукции, прибылью и другими показателями, рассматриваемыми как средние величины. Следовательно, решение проблемы функционирования технологического процесса состоит в том, чтобы найти вектор управления $\vec{r}(t)$, обеспечивающий экстремальные значения условия

$$E\{\vec{x}(t); \vec{r}(t); \vec{f}(t)\} \qquad (6)$$

и одновременно удовлетворяющий ограничениям и связям, налагаемым его внутренними свойствами.

Решение этой экстремальной проблемы ввиду ее трудности можно осуществить с помощью метода последовательных приближений, причем первое и второе приближения определяются в результате: а) этапа идеальной или первичной оптимизации, состоящей в нахождении идеального, но обычно нереализуемого вектора управления $\vec{r}_{\text{ид}}(t)$; б) этапа вторичной оптимизации (оптимизация качества управления), в результате которой находится оптимальный и в то же время реализуемый вектор управления $\vec{r}_{\text{опт}}(t)$.

На первом этапе учитывается лишь важнейшее свойство технологического процесса. Этап вторичной оптимизации заключается в получении решения, наименее отличающегося от идеального и в то же время наиболее полно учитывающего ограничения и связи, налагаемые свойствами управления процессом.

Для количественной характеристики отклонение оптимального реализуемого решения E от идеального $E_{\text{ид}}$ вводится величина, представляющая функционал Q_1, характеризующий эффективность

$$Q_1 = Q\{E_{\text{ид}} - E\}, \qquad (7)$$

где $E_{\text{ид}}$ – экстремум показателя цели управления; E – значение показателя цели управления (эффективность), обеспечиваемое реальной системой.

Основная задача синтеза технологического процесса состоит в том, чтобы достигнуть наивыгоднейших условий компромисса между противоречивыми требованиями качества и реализуемости управления.

Показателем, характеризующим эффективность технологического процесса, можно назвать функционал

$$C_1 = C\{Q_1, P\}, \qquad (8)$$

где P – величина, характеризующая условие реализуемости управляющей системы (например, меру ее точности, стоимости, сложности, надежности и др.).

В частном случае функционал (8) может иметь вид

$$C_1 = Q_1 + \lambda P, \tag{9}$$

где λ – некоторый весовой коэффициент.

Для вторичной оптимизации характерна задача определения вектора управления $\vec{r}(t)$, обеспечивающего минимум величины:

$$C_1 = C\{Q_1, P\}.$$

Оптимальный реализуемый алгоритм управления $\bar{R}_{\text{опт}}$ можно представить в виде

$$\vec{r}_{\text{опт}}(t) = \vec{R}_{\text{опт}}\{\vec{x}(t), t\}. \tag{10}$$

Следовательно, проблема синтеза технологического процесса состоит в определении и реализации вектора управления $\vec{r}(t)$, обеспечивающего экстремум показателя эффективности управления (10) при достижении цели управления (8) и удовлетворяющего связям (2) и ограничениям (4).

В таком виде решение общей задачи управления сложно, и оно заменяется часто более простой задачей, когда показатель эффективности не зависит в явной форме от показателя цели. В этом случае чаще всего показателем эффективности может служить показатель точности изделия, т.е. функционирование системы определяется возможностью предсказания с достаточной степенью точности реакции системы на заданное входное воздействие. При этом вектор ошибки $\vec{\varepsilon}_{\text{ид}}$ будет равен

$$\varepsilon_{\text{ид}}(t) = \vec{x}_{\text{ид}}(t) = \vec{x}(t), \tag{11}$$

где $\vec{x}_{\text{ид}}$ и $\vec{x}(t)$ – соответственно идеальный и реальный векторы состояния производственного процесса. Показатель точности тогда выразится в виде функционала от ошибки

$$l(t) = \Phi\{\vec{\varepsilon}_{\text{ид}}(t)\}. \tag{12}$$

Очевидно, что решение задачи минимизации функционала (12) значительно проще минимизации функционала (10).

В качестве показателя точности можно выбрать функционал вида

$$l = \int_0^T \varphi\{l_{\text{ид}}(t)\}dt, \qquad (13)$$

где $\varphi\{l_{\text{ид}}(t)\}$ – некоторая непрерывная функция от $\vec{\varepsilon}_{\text{ид}}(t)$.

Функционал l является мерой отклонения в интервале $(0,T)$ действительного вектора состояния $\vec{x}(t)$ от идеального вектора состояния $\vec{x}_{\text{ид}}(t)$ совместно с имеющимися ограничениями на изменение вектора $\vec{r}(t)$.

Иногда интерес представляет мера полного отклонения на достаточно большом интервале времени, т.е. вместо функционала (13) с конечными пределами рассматривается функционал вида

$$l = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi\{l_{\text{ид}}(t)\}dt \qquad (14)$$

с бесконечными пределами.

Возможен также и другой случай, когда интерес представляет мера ошибки лишь в определенный момент времени $t = T$. В этом случае

$$l = \varphi\{\varepsilon_{\text{ид}}\}, \qquad (15)$$

при $t = T$.

Решение задачи на минимум функционала (14) при имеющихся ограничениях в связях позволяет найти оптимальный вектор состояния $\vec{x}_{\text{опт}}(t)$ [вектор задания – $\vec{q}(t)$].

На рис. 4 изображена схема, поясняющая рассмотренный выше принцип управления технологическим процессом, когда показателем эффективности управления является показатель точности $\vec{\varepsilon}_{\text{ид}}$ изготовляемого прибора.

Пусть позиция I – идеальный производственный процесс изготовления РЭС или его модель, в результате которого получается прибор с характеристикой $x_{\text{ид}}$.

Позиция II – исследуемый реальный технологический процесс изготовления РЭС, в результате которого получается прибор с реальной точностной характеристикой $\vec{x}$.

Позиция III – вычислитель идеального режима (функционирования) технологического процесса, служащий для построения идеального производственного процесса, в результате которого выходит прибор с характеристикой $\vec{x}_{\text{ид}}$.

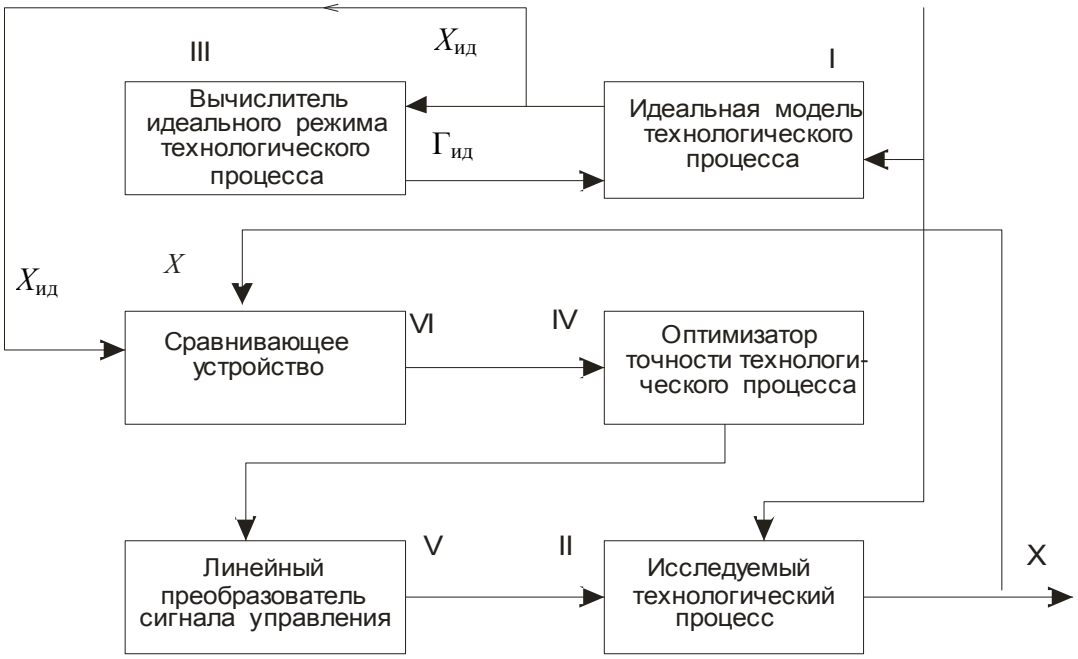


Рис. 4. Обобщенная функциональная схема оптимального управления технологическим процессом производства РЭС по точностному параметру

Позиция IV – оптимизатор точности управления технологическим процессом, служащий для создания такого воздействия через усилитель V, чтобы характеристика изготовляемой РЭС отвечала определенной заданной точности.

Работу системы, управляющей точностными технологическими (производственными) характеристиками изготовляемой РЭС, можно представить как работу следящей системы, где задающим входным воздействием принято считать значение точностного показателя идеального технологического процесса. Необходимо также устройство, реализующее (моделирующее) идеальный технологический процесс (цикл) и идеальную систему управления им (III) при воздействии на них реальных систематических и случайных факторов. Таким устройством может быть электронно-вычислительная машина.

Значение величины реальной точностной характеристики объекта производства $\vec{x}$ сравнивается в устройстве сравнения VI со значением идеальной характеристики объекта $\vec{x}_{ид}$. Результат сравнения $\vec{\varepsilon}_{ид}$ оптимизируется оптимизатором IV, и его значение является управляющим сигналом для реального технологического процесса, т.е. воздействует на него, изменяя параметры процесса таким образом, чтобы получить минимальное отличие значений точност-

ных характеристик реального объекта производства от его идеальных значений. Как видно из рис. 4, оптимальный вектор состояния $\vec{x}_{\text{опт}}$ или вектор задания $\vec{q}(t)$ сравнивается с действительным вектором состояния $\vec{x}(t)$ в сравнивающем устройстве, на выходе которого получается сигнал ошибки $\vec{\varepsilon}(t)$:

$$\vec{\varepsilon}(t) = \vec{x}_{\text{опт}} - \vec{x}(t). \qquad (16)$$

В этом случае необходимо выполнение требования устойчивости технологического процесса.

2.5. Основные направления развития технологии радиоэлектронных средств

Основными направлениями развития РЭС являются микроминиатюризация, повышение степени интеграции и комплексный подход к разработке. Микроминиатюризация – это микромодульная компоновка элементов с применением интегральной и функциональной микроэлектроники. При микромодульной компоновке элементов осуществляют микроминиатюризацию дискретных ЭРЭ. В основе интегральной микроэлектроники лежит использование ИС и больших интегральных схем (БИС), применение групповых методов изготовления, машинных методов проектирования ТП, изготовления и контроля изделий.

Функциональная микроэлектроника основана на непосредственном использовании физических явлений, происходящих в твердом теле или вакууме (магнитные, плазменные и т.д.). Элементы создают, используя среды с распределенными параметрами. Основной задачей здесь является получение сред с заданными свойствами.

Трудоемкость производства сборочных единиц РЭС может быть представлена в таком соотношении: механообработка – 8–15 %, сборка – 15–20 %, электрический монтаж – 40–60 %, наладка – 20–25 %.

Следовательно, основными конструктивно-технологическими задачами производства РЭС являются разработка ИС на уровне ячеек и сборочных единиц и совершенствование технологии их изготовления, повышение плотности компоновки навесных элементов на ПП и плотности печатного монтажа; совершенствование методов электрических соединений модулей 1–4-го уровней, развитие авто-

матизированных и автоматических методов, средств наладки и регулировки аппаратуры сложных радиотехнических систем (РТС), создание гибких автоматизированных производств.

В технологии производства РЭС используются процессы, свойственные машино- и приборостроению: литье, холодная штамповка, механическая обработка, гальванические и лакокрасочные покрытия.

Формирование технологии РЭС можно условно характеризовать следующими этапами.

Первый этап: до 1950 г. – разработка и внедрение поточно-конвейерных способов сборки и монтажа, прогрессивных способов выполнения отдельных операций при изготовлении деталей и узлов РЭС, изготовленных на электронных лампах и с навесным монтажом.

Второй этап: 1950–1965 гг. – разработка и внедрение механизированных и автоматизированных способов выполнения операций сборки, монтажа и регулировки РЭС, использующей печатный монтаж и работающей на полупроводниковых приборах; также внедрение автоматизированных и механизированных ТП изготовления деталей и узлов РЭС.

Третий этап: настоящее время – характерно для РЭС как переходный этап к следующему, высшему этапу совершенствования конструкции и технологии РЭС с использованием принципов микроэлектроники и проведением в связи с этим работ в области решения проблемы интегрирования различных технологических стадий. Решение этой проблемы позволит исключить большое количество схемных соединений и полностью автоматизировать операции, выполняемые взамен сборки.

Уровень технологии в настоящее время достаточно высок и обеспечивает создание малогабаритной и высоконадежной аппаратуры. Технология постоянно обновляется, ее совершенствование является важным условием технического прогресса.

К основным направлениям совершенствования современной технологии можно отнести:

- переход от прерывистых (дискретных, циклических) процессов к непрерывным поточным процессам, обеспечивающим увеличение масштаба производства и эффективное использование машин и оборудования; внедрение «замкнутой» (безотходной) технологии с целью наиболее полного использования сырья, энергии, топлива, ликвидации отходов производства, оздоровления окружающей среды;

- повышение эффективности извлечения ископаемых, их обогащения и переработки, комплексности использования;
- механизацию и автоматизацию ТП.

Практика показывает, что многие традиционные технологические процессы в производстве РЭС часто оказываются недостаточно эффективными (т.е. неоптимальными) по мере постоянного и быстрого технического совершенствования РЭС. В связи с этим возникает задача исследования на оптимальность действующих ТП с целью определения возможностей повышения их эффективности.

При этом особенно сложной в производстве РЭС оказывается задача формализации (математического описания) и моделирования ТП. Поэтому современный инженер-технолог РЭС, кроме знаний физической сущности технологии, должен владеть специальными математическими методами анализа, оптимизации и формализации ТП. Основой оптимизации ТП с применением ЭВМ являются методы линейного, нелинейного, целочисленного, динамического программирования и теории массового обслуживания.

В результате решения этой задачи можно создать оптимальную структуру производственного процесса и его отдельных звеньев, получить такой ТП, который наиболее гибко реагирует на изменение внешних условий и характеристик звеньев, а также перейти к созданию автоматизированных ТП, что, в свою очередь, позволяет существенно повысить техническую и экономическую эффективность, производительность, качество изделий.

2.6. Построение ТП в зависимости от типа производства

Тип производства определяет построение и степень детализации разработки ТП. Под типом производства понимается классификационная категория производства, выделяемая по признакам широты номенклатуры, регулярности, стабильности и объема выпуска изделий. Одной из основных характеристик типа производства является коэффициент закрепления операций (ГОСТ 3.1106–74 ЕСТД) $K_{зо}$, который равен отношению количества выполняемых операций в месяц O к количеству рабочих мест P:

$$K_{зо} = \frac{O}{P}. \qquad (17)$$

Различают три типа производства: единичное, серийное и массовое. Единичное производство характеризуется широкой номенклатурой изготавливаемых изделий с малым объемом их выпуска, $K_{з.о}$ для него не регламентируется. Для серийного производства характерна ограниченная номенклатура изделий, изготавливаемых периодически повторяющимися партиями и сравнительно большим объемом выпуска. В зависимости от количества изделий в партии и значения $K_{з.о}$ различают мелкосерийное, серийное и крупносерийное производства. $K_{з.о}$ принимается равным для мелкосерийного – 20–40, среднесерийного – 10–20, крупносерийного – от 1 до 10. Массовое производство характеризуется узкой номенклатурой и большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых или ремонтируемых в течение продолжительного времени. Коэффициент закрепления операций равен 1 или меньше 1, если одна операция выполняется на двух или более рабочих местах. Наиболее характерные особенности типов производства представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характерные особенности типов производства

Элемент сравнения	Тип производства		
	единичное	серийное	массовое
Широта номенклатуры	Очень широкая	Ограниченная	Узкая
Объем выпуска	Малый	Средний	Очень большой
Регулярность выпуска	Нет	Периодические партии	Непрерывный
Специализация рабочих мест	Отсутствует	Выполнение нескольких операций	Выполнение одной операции
Технологическое оснащение	Универсальное	Специализированное	Специальное
Взаимозаменяемость	Весьма ограниченная	Полная или неполная (с набором деталей)	Полная
Квалификация рабочих	Высокая	Средняя	Низкая
Себестоимость	Высокая	Средняя	Низкая

Пользуясь этой таблицей, нетрудно составить характеристику каждому типу производства.

2.7. Классификация технологических процессов

Производственный процесс включает все этапы, которые проходит природный материал на пути превращения его в изделие. На радиозаводе выполняется часть производственного процесса, поскольку завод получает полуфабрикаты в виде материалов и комплектующих изделий (лампы, микроэлементы, крепеж и др.). Производственный процесс на радиозаводе делится на ряд процессов, выполняемых в различных цехах (заготовительных, обработки и сборки) (рис. 5).

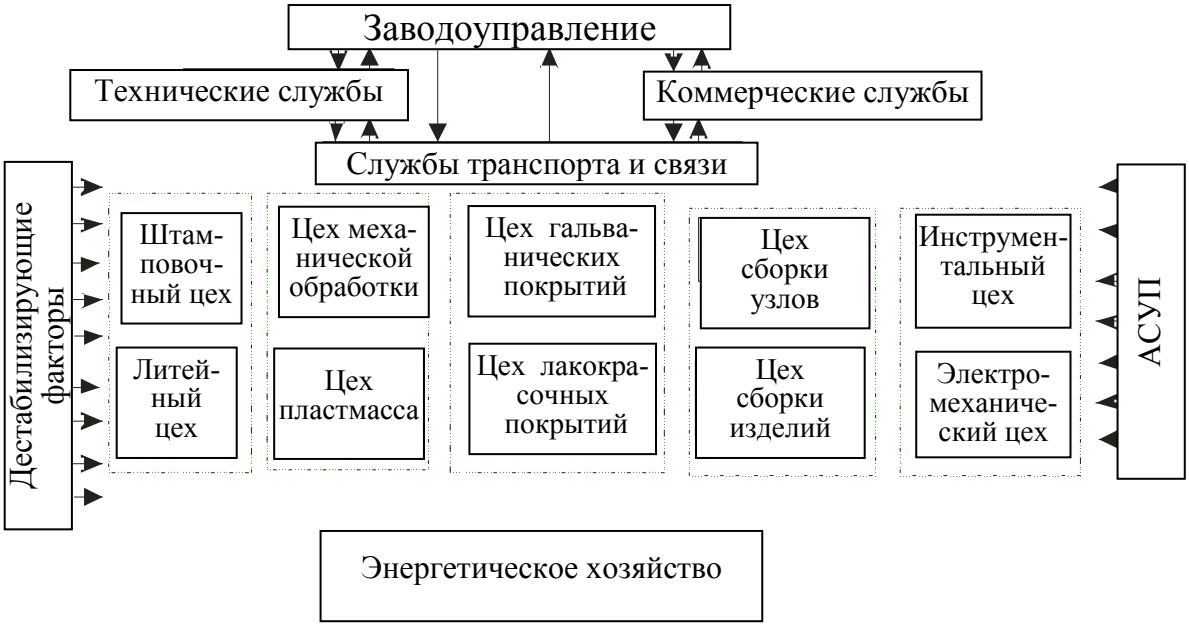


Рис. 5. Структура современного радиозавода

На радиозаводе различные изделия выпускаются в разных количествах. Применительно к одному и тому же заводу или его цеху можно говорить о разных типах производства – единичном, серийном и массовом. При единичном производстве изготовление изделий по неизменяемым чертежам не должно повторяться.

При серийном производстве изделия детали и узлы периодически изготовляются по неизменяемым чертежам в течение того или иного промежутка календарного времени.

Количество одновременно запускаемых в производство изделий, их деталей или узлов, поступающих на одно рабочее место, представляет собой партию.

При массовом производстве изделия детали и узлы изготовляются в массовом количестве в течение более или менее длительного промежутка календарного времени. При этом большинство рабочих выполняют одну и ту же работу.

Поскольку на данном заводе или цехе одновременно могут быть единичное, серийное и массовое производства, а границы между ними различны (зависят от вида изделия и других факторов), отнесение производства завода или цеха к одному из типов производства определяют по преобладающему типу производства.

При единичном производстве разрабатываются индивидуальные процессы, а для некоторых деталей и узлов могут быть составлены групповые и даже типовые процессы.

При серийном производстве разрабатываются технологические процессы всех трех видов, причем надо стремиться к увеличению доли групповых и типовых процессов по сравнению с индивидуальными. Групповые процессы, особенно при мелких сериях, являются основными.

В массовом производстве разрабатываются обычно индивидуальные и типовые технологические процессы.

Типизация технологических процессов согласно ГОСТ 14.303–73 устраняет многообразие технологических процессов обоснованным сведением их к ограниченному числу типов (рис. 6).

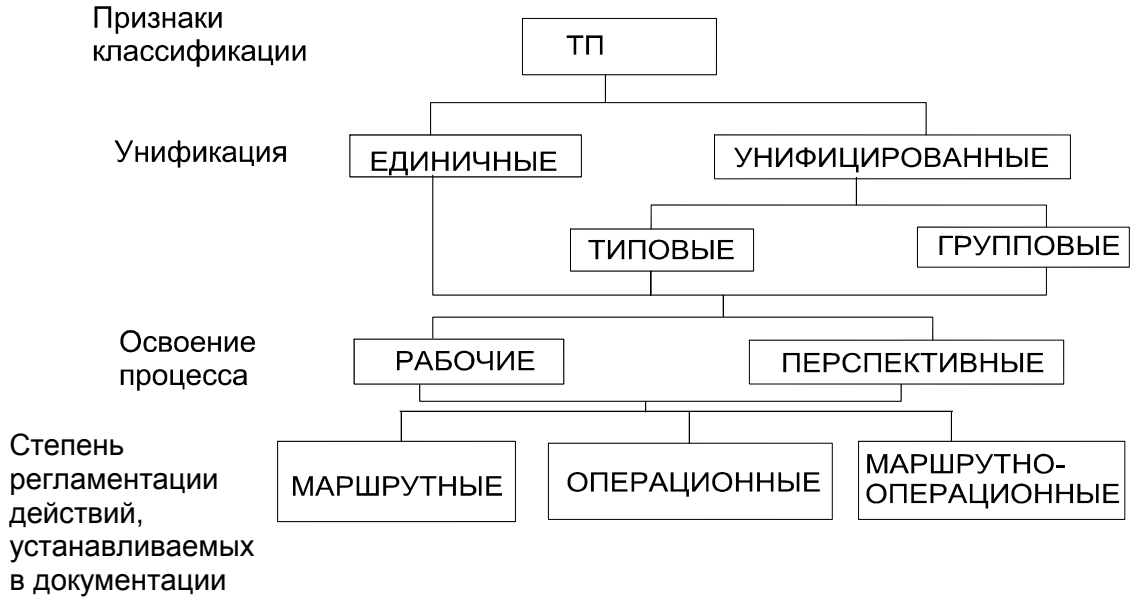


Рис. 6. Классификация технологических процессов

Основные этапы разработки типовых технологических процессов, задачи, решаемые на каждом этапе, и основные документы, обеспечивающие решение этих задач, регламентируются ГОСТ 14 303–73.

Единичные ТП разрабатываются для изготовления опытного образца изделия. Рабочие ТП являются тем самым конечным продуктом деятельности технолога-разработчика, позволяющим перейти к серийному выпуску изделия на основном производстве.

Перспективный процесс разрабатывается как информационная основа для рабочих процессов при перевооружении производства и рассчитан на применение более совершенных методов, более производительных и экономически эффективных средств.

Маршрутное описание ТП – сокращенное описание всех ТО в маршрутной карте в последовательности их выполнения без указания переходов и технологических режимов.

Операционное описание ТП – полное описание всех ТП в последовательности их выполнения с указанием переходов и технологических режимов.

Маршрутно-операционное описание ТП – сокращенное описание технологических операций в маршрутной карте в последовательности их выполнения с полным описанием отдельных операций в других ТД.

Перспективные ТД разрабатываются на несколько лет вперед с учетом последних достижений науки, еще не нашедших широкого применения, но сулящих большие технико-экономические преимущества.

Единичный ТП – ТП изготовления или ремонта изделия одного наименования, типоразмера и исполнения независимо от типа производства.

Типовой ТП – ТП изготовления группы изделий с общими конструктивными и технологическими признаками.

Типовой ТП представляет собой оптимальный вариант процесса, опираясь на который, каждый завод может разработать свой **рабочий** ТП в соответствии с имеющимися возможностями (наличием технологического оборудования, с технологическим опытом, квалификацией рабочих и т.п.).

Групповой ТП – ТП изготовления группы изделий с разными конструктивными, но общими технологическими признаками.

Типовая технологическая операция – это операция, характеризуемая единством содержания и последовательности технологиче-

ских переходов для группы изделий с общими конструктивными и технологическими признаками.

Групповая технологическая операция – это операция совместного изготовления группы изделий с разными конструктивными, но общими технологическими признаками.

2.8. Этапы разработки технологических процессов

2.8.1. Основные понятия проектирования технологии

В соответствии с ГОСТ 3.1102 «Стадии разработки и виды документов» стадии разработки технологических документов, применяемых для технологических процессов изготовления изделий, определяются в зависимости от стадий использования конструкторской документации. Пример соответствия стадий разработки и технологических документов приведен в табл. 2.

Таблица 2

Пример соответствия стадий разработки и технологических документов

Стадия разработки	Содержание работ, технологический документ
Предварительный проект	Разработка технологической документации, предназначенной для изготовления макета изделия и/или его составляющих частей на основании конструкторской документации, выполняемой на стадиях «Эскизный проект» (ЭП), «Технический проект» (ТП)
Разработка документации:	Разработка технологической документации для изготовления и испытания без применения литеры.
а) опытного образца (опытной партии)	Корректировка и разработка документации по результатам предварительных испытаний опытного образца с присвоением литеры О на основную конструкторскую документацию, имеющую литеру О. Корректировка и разработка технологических документов по результатам изготовления и приемочных испытаний образца и по результатам корректировки конструкторской документации, имеющей литеру О1. И т.д. с литерой О2.
б) серийное (массовое) производство	Разработка технологической документации, предназначенной для изготовления и испытаний серийного (массового) производства с присвоением литеры Б на основную конструкторскую документацию, имеющую ту же литеру

На стадии разработки конструкторской документации «Технический проект» технологическая документация не разрабатывается.

Для разового изготовления или изготовления нескольких изделий в единичном производстве присваивается литера И.

Предварительный проект предназначен для проверки технологичности изделия на стадии эскизного и технического проектов. Он содержит перечни специальных и типовых ТП, технического задания на разработку специального технологического оборудования и оснастки. Предварительный проект служит основанием для разработки рабочей документации: опытного образца, установочной серии, серийного или массового производства.

При разработке документации на технологические процессы, выполняемые на стадиях «Предварительный проект», в случае опытного образца документы следует выполнять в маршрутном или маршрутно-операционном описании; в случае серийного производства – в операционном описании.

Документы, разрабатываемые на ТП, делятся на основные и вспомогательные. Основные документы содержат сводную информацию, необходимую для решения одной или комплекса инженерно-технических, планово-экономических и организационных задач. Эти документы полностью и однозначно определяют технологический процесс (операции) изготовления или ремонта изделия.

Вспомогательные документы применяются при разработке и внедрении функциональных технологических процессов и операций (карта заказов на проектирование технологической оснастки).

По своему назначению документы делятся на документы общего и специального назначения. Документы общего назначения – это документы, применяемые в отдельности или в комплектах документов на технологические процессы (операции) независимо от применения технологических методов изготовления или ремонта изделий, например, карта эскизов (графический документ, содержащий эскизы, схемы, таблицы и предназначенный для пояснения выполнения ТП, операций или переходов изготовления или ремонта изделий, включая контроль и перемещения), технологическая инструкция, титульный лист.

Документы специального назначения применяются при описании ТП и операций в зависимости от типа и вида производства и применяемых технологических методов изготовления или ремонта.

В качестве примера документа специального назначения можно рассмотреть маршрутную карту, которая предназначена для маршрутного или маршрутно-операционного описания изготовления или ремонта изделия, включая контроль параметров по всем операциям различных технологических методов с указанием данных об оборудовании, технологической оснастке, материальных нормативах и трудовых затратах. К документам этого же вида относится и карта технологического процесса (КТП), предназначенная для операционного описания ТП изготовления или ремонта изделия в технологической последовательности по всем операциям одного вида формообразующей структуры, сборки или ремонта с указанием переходов.

Основным технологическим документом является технологический регламент производства. Он бывает типовым (для всех предприятий, выпускающих данный вид продукции) и конкретного предприятия (конкретный регламент данного предприятия). В любом случае он содержит (в случае типового регламента все документы типовые):

- общие сведения о технологии производства данного вида продукции;
- требования к сырьевым материалам, комплектующим изделиям, топливу и энергии;
- сведения о нормативно-технических документах, содержащих технические требования к продукции;
- требования к технологическому оборудованию и системам автоматизации;
- требования к вспомогательным материалам и оборудованию;
- описание технологических режимов производства;
- маршрутную карту производства;
- карту контроля технологических процессов;
- технологические инструкции выполнения работ;
- правила охраны труда и техники безопасности;
- описание источников выделения вредных веществ и излучений и нормативы допустимых выбросов;
- нормативы расхода топливоэнергетических и сырьевых материалов и комплектующих изделий.

Остальные документы специального назначения только укажем без расшифровки документа:

- карта технологического процесса;
- технико-нормировочная карта;
- карта кодирования информации;
- карта наладки средств технологической оснастки;
- ведомость оборудования;
- ведомость материалов;
- ведомость специфицированного нормирования расхода материалов;
- ведомость нормирования расхода материалов;
- технологическая ведомость;
- ведомость применяемости;
- ведомость сборки изделия;
- ведомость операций (применяется совместно с МК и КТП);
- ведомость деталей сборочных единиц к типовому ТП для указания состава деталей изготовления или ремонта по ТТП;
- ведомость деталей, изготавливаемых из отходов;
- ведомость дефектации;
- ведомость стержней;
- ведомость технологических документов;
- ведомость держателей подлинников.

Исходными данными и основными критериями для выбора структуры технологической системы являются экономические показатели и технологическая оптимизация.

2.8.2. Выбор структуры технологической системы по экономическим показателям

Структура технологической системы (ТС) определяется требованиями эффективности функционирования. Все элементы вносят свой вклад в полную себестоимость изделия. С позиций структуры ТС себестоимость изделия определяется:

- суммарной стоимостью работ по изготовлению, сборке и контролю сборочных единиц различных уровней;

• суммарной стоимостью всех запасов по всем номенклатурам на складах всех уровней, стоимостью хранения запасов (количество, амортизация складов, обеспечение обслуживающего персонала, транспортировка).

Тогда суммарные затраты выражаются некоторой линейной функцией $C(M,L,K,S,\text{P})$, где $M(n)$ – объем запасов по их видам 1...A; $L(n)$ – интенсивность спроса на компоненты 1...B; $S(n)$ – число наименований операций изготовления и сборки каждого вида изделий 1...C; $K(n)$ – сложность оборудования и оснастки по их видам 1...D; $P(n)$ – квалификация специалистов 1...E.

При синтезе эффективной ТС необходимо обеспечить $\min C(M,L,K,S,P)$.

На величину технологической себестоимости годного изделия, помимо структуры ТП, влияют:

• величины конструкторского допуска на первичные конструкционные материалы, определяющие вероятность выхода годных изделий при той или иной точности изготовления;

• вид и параметры распределения плотности вероятности показателя качества изделия, также определяющие вероятность выхода годных изделий;

• технологическая точность (точность изготовления), определяющая затраты на производство изделия при заданной структуре ТП;

• вид и параметры распределения плотности вероятности показателя качества.

Проблема минимизации технологической себестоимости годного изделия должна рассматриваться как комплексная, ее решение включает в себя взаимосвязанное рассмотрение системотехнических, схемотехнических, конструкторских и технологических задач проектирования.

Таким образом, под технологической оптимизацией будем понимать взаимосвязанный выбор схемотехнической (топологической) реализации изделия, номинальных значений его конструкционных параметров и технологической точности при заданных ограничениях по критерию минимальной технологической себестоимости годного изделия. Технологическая оптимизация ведется на базе результатов параметрического синтеза устройства и синтеза ТП. (Параметрический синтез характеризуется жесткой стратегией получения единственного квазиоптимального варианта ТС, где выяв-

ляются связи параметров системы с критериями качества, т.е. величинами, однозначно связанными с качеством системы, которые образуют оптимизационную модель).

Объектом технологической оптимизации являются схемотехнические и топологические решения устройства, при синтезе которых оптимально удовлетворены требования обеспечения заданных эксплуатационных параметров, найдены допустимые отклонения электрических и конструкционных параметров от их номинальных значений и ТП их изготовления. При технологической оптимизации необходимы:

- оценка вероятности выхода годных изделий, учитывающая, что оптимизируется единая система с взаимновлияющими параметрами (условной вероятностью);
- поиск такого сочетания конструкционных параметров, чтобы вероятность выхода годных была максимальна.

Если решена первая задача, то на основе этого для решения второй можно использовать стандартные методы оптимизации. Основой алгоритма в этом случае является циклическое определение соответствия всех электрических параметров полям допусков при случайных выборах значений конструкционных параметров. Массив значений конструкционных параметров формируется так же, как в методе статистических испытаний с использованием датчика случайных чисел при учете корреляции между параметрами. Законы распределения конструкционных параметров принимаются гауссовскими.

Для каждой реализации массива значений конструкционных параметров последовательно рассчитываются значения электрических параметров и сравниваются с допустимыми отклонениями. При несоответствии значения параметра полю допуска расчет для данной реализации прекращается, и формируется следующая реализация. Та, при которой удовлетворены ограничения на все электрические параметры, регистрируется, после чего цикл повторяется для следующей реализации. Соотношение общего числа реализаций и реализаций, удовлетворяющих всем наложенным ограничениям, рассматривается как условная вероятность выхода годных.

При изменяемом ТП минимум технологической себестоимости годного изделия достигается взаимосвязанным выбором номинальных значений его конструкционных параметров, технологической точности и структуры ТП. Выделим три наиболее общих случая:

1) устойчивый и стабильный ТП целенаправленно изменяется по точности без изменения структуры за счет изменения точности операций;

2) ТП целенаправленно изменяется по структуре и точности, оставаясь устойчивым и стабильным;

3) ТП неустойчив за счет наличия систематических погрешностей и подлежит периодической корректировке.

Для отыскания условий оптимума во всех трех случаях приемлемы стандартные методы оптимизации. Для первых двух случаев задача оптимизации формулируется одинаково.

Пусть Y – вектор номинальных значений управляемых эксплуатационных параметров; s – вектор их среднеквадратичных отклонений. Минимизируемой (целевой) функцией является технологическая себестоимость годного изделия, критерием оптимальности – ее условный минимум $\min C_t(Y,s)$ при выполнении ограничений: $Y \subset YP$, $Y \subset YD$; $s \subset sP$, где YP – область работоспособности; YD – допустимая область; sP – область реализуемых среднеквадратичных отклонений.

Для третьего случая в целевую функцию включается T_k – время до корректировки ТП, таким образом, целевая функция имеет вид $C_t(Y,s,T_k)$ при неизменном критерии оптимальности – условном минимуме целевой функции в случае выполнения, помимо трех указанных и четвертого ограничения $T_{\text{тп}} > T_k > 0$ ($T_{\text{тп}}$ – время, в течение которого функционирует ТП). Выбор точности ТП без изменения его структуры связан с выбором технологического оборудования по показателям точности, выбором точности поддержания режимов технологических операций и методов обеспечения этой точности. В результате точность ТП связана с величиной технологической себестоимости и определяет вероятность выхода годных изделий. Таким образом, целевая функция имеет вид

$$C_t = C_t(s)/P_y(Y, s) \rightarrow \min, \qquad (18)$$

где $C_t(s)$ – себестоимость изготовления партии изделий; $P_y(Y, s)$ – вероятность выхода годных изделий.

В общем случае в процессе технологической оптимизации варьируется точность выполнения отдельных операций в зависимости от выбора технологического оборудования и методов обеспечения этой точности.

Все перечисленные выше изменения должны быть взаимосвязаны, т.е. решение задачи в рамках автономных систем автоматизированного проектирования конструкций (САПР К) и систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПРТ П) не представляется возможным.

Основными этапами разработки технологических процессов являются:

1. **Изучение конструкции детали**. По рабочему чертежу детали и чертежам сборочных единиц, куда входит деталь, получают полное представление о форме детали, размерах и их точности, шероховатости обработанных поверхностей, физических и технологических свойствах материала, функциях детали в изделии и о специальных технических требованиях; выясняют, какие поверхности являются рабочими и какие элементы конструкции (поверхности, линии, точки) являются главными конструктивными базами.

Важнейшей задачей изучения чертежа является оценка технологичности конструкции детали и степени соответствия конструкции требованиям заданного объема производства. Анализ технологичности детали включает следующие основные проверки: целесообразность формы детали, степень ее пригодности для получения заготовки высокопроизводительными методами (литьем, штамповкой и др.); правильность выбора марки материала с учетом условий производства и назначения детали; соответствие номинальных размеров ГОСТ 6636–60; целесообразность допусков на размеры, указанные в чертеже, с точки зрения служебного назначения детали и условий производства; правильность основных размеров и увязку размерных цепей; правильность выбранных защитных покрытий; отсутствие ошибок и неточностей в выполнении графики чертежа; отсутствие ошибок в технических требованиях чертежа.

При оценке технологичности конструкции следует учитывать требования надежности работы детали в изделии в процессе эксплуатации и требования оптимальной стоимости ее изготовления.

Составление плана технологических операций обработки детали выполняют в зависимости от материала детали, точности размеров и параметров шероховатости поверхностей.

2. **Расчет операционных размеров**. Операционными называются размеры, координирующие обрабатываемые поверхности в технологических операциях. Операционные размеры всех операций, предшествующих операции окончательной обработки, отли-

чаются от соответствующих чертежных размеров на величину припуска.

Припуском называется слой материала, прилегающий к поверхности заготовки и подлежащий удалению с целью получения заданного размера обработанной поверхности.

В промежуточных операциях обработки поверхностей следует различать два вида припуска: припуск, который удаляется с обрабатываемой поверхности в виде отхода (стружки), и припуск, который образуется в данной операции и подлежит удалению при обработке в следующей. Этот последний входит в состав операционного размера данной операции и определяется при проектировании технологического процесса. Припуск обусловлен необходимостью устранения в последующих операциях обработки погрешностей размеров, формы поверхности, шероховатости и дефектного слоя, возникающих в рассматриваемой операции. Вместе с тем размер припуска ограничивается экономическими факторами: трудоемкостью обработки, отходом материала в стружку, износом режущего инструмента, расходом энергии на обработку и др. Поэтому выбор оптимального припуска является весьма важной задачей в проектировании технологических операций обработки. На основании теоретических и экспериментальных исследований оптимальный припуск для обработки плоских поверхностей определяют по формуле

$$Z_i = R_{zi} + T_i + \delta_i + U_i + F, \qquad (19)$$

где Z_i – припуск, образующийся в данной операции; R_{zi} – параметр шероховатости поверхности, обработанной в данной операции; T_i – толщина дефектного слоя; δ_i – допуск операционного размера в данной операции; U_i – погрешность установки в i-й операции; F – погрешность расположения поверхностей, вызываемая термической обработкой, учитывается в припусках операционных размеров операций, предшествующих термической обработке.

Для обработки поверхностей тел вращения припуск на диаметр определяется по формуле

$$Z_i = (2R_{zi} + T_i) + \delta_i + U_i + F. \qquad (20)$$

Допуск δ_i выбирают в соответствии с технологическими возможностями проектируемой операции обработки.

В повседневной практике для типовых технологических операций припуски берутся по таблицам справочников или отраслевых нормалей.

Операционные размеры определяются следующим уравнением общего вида:

$$A_n = A + Z_{n+1} + Z_{n+2} + \ldots + Z_{n+m}, \qquad (21)$$

где A_n – операционный размер n-й технологической операции; A – номинальный размер по чертежу детали; Z – припуск на следующую операцию; m – количество следующих операций обработки.

Размер исходной заготовки, координирующий поверхность, подлежащую обработке на основе уравнения (21), определяют по формуле

$$A_0 = A + Z_1 + Z_2 + \ldots + Z_m. \qquad (22)$$

3. **Выбор и обоснование способа получения исходной заготовки**. В зависимости от размеров формы, материала и программы выпуска детали выбирается способ изготовления исходной заготовки. Рациональная форма заготовки должна быть максимально подобной форме готовой детали. Размеры заготовки отличаются от размеров готовой детали на сумму операционных припусков.

Для металлических деталей простой формы в качестве заготовок применяются отрезки стандартных профилей: круглых, квадратных, шестигранных, труб, уголков, листов, полос и т.д.

Для деталей сложной формы на заводах радиотехнических изделий применяют следующие основные способы изготовления заготовок: литье, горячая и холодная штамповка, прессование из пластмасс и металлокерамики. При разработке технологии выбирают наиболее экономически целесообразный способ получения заготовки, определяют ее конструкцию.

4. **Выбор технологического оборудования**. Выбор оборудования для выполнения операций технологического процесса основывается на выполнении требований: высокой производительности процесса формообразования; геометрической точности и оптимальной стоимости обработки. Производительность и точность обработки определяются типом и физическим состоянием оборудования, а стоимость обработки – его потребляемой мощностью, поэтому определенным массам и габаритам деталей соответствуют определенные типоразмеры технологического оборудования. Сведения об эксплуатационных данных технологического оборудования берут из технических характеристик, имеющихся в каталогах или паспортах.

5. **Проектирование операций технологического процесса.** На основе перечня операций обработки отдельных поверхностей компонуют операции технологического процесса детали, реализуя возможности совмещения обработки двух и более различных поверхностей в одной операции. Контрольные операции вводят в общую последовательность операций обработки в тех местах, где это окажется целесообразным. Термическая обработка делит технологический процесс на два этапа: предшествующий термической обработке и последующий. На первом этапе выполняют операции предварительной обработки точных поверхностей и окончательной обработки поверхностей низких классов точности и шероховатости, на втором этапе (после термической обработки) – операции окончательной обработки точных поверхностей. Это обусловлено тем, что в процессе термической обработки происходит деформация изделий, сопровождаемая изменениями формы, размеров и относительного расположения поверхностей. На втором этапе обработки эти погрешности могут быть исправлены.

При определении объема работ, включаемых в отдельные операции, необходимо выполнить условие равенства или кратности нормы штучного времени на операцию такту производства изделий при заданной программе выпуска. Операциям технологического процесса присваиваются порядковые номера и названия. Предпочтительной является пятковая нумерация операций (5, 10, 15, 20...). Название операций, как правило, соответствует названию технологического оборудования, на котором выполняется операция.

После составления общего плана и определения ориентировочного состава операций приступают к техническому оформлению их в соответствии с Единой системой технологической документации.

Проектирование операции включает в себя:

- вычерчивание операционных эскизов для формообразующих операций;
- описание содержания операций в виде перечня переходов определенной последовательности;
- выбор параметров режимов работы технологического оборудования;
- расчет ожидаемой точности обработки;
- техническое нормирование объема работ каждой операции; разработка технических заданий на проектирование специальной оснастки;

• технико-экономическое обоснование выбранного варианта технологического процесса;

• техническое оформление операционных карт и карты технологического маршрута.

6. **Операционные эскизы**. На операционном эскизе обрабатываемое изделие (заготовка или деталь) изображают в том виде, какой она приобретает после выполнения данной операции. Изображение детали (заготовки) на эскизе выполняется по методу прямоугольного проектирования, при этом ее располагают на эскизе в рабочем положении, т.е. так, как она установлена на станке при выполнении операции обработки. Эскиз выполняется с помощью чертежных инструментов с соблюдением всех требований ГОСТ, применяемых для Единой системы конструкторской документации, но в произвольном масштабе.

На операционном эскизе проставляют только те размеры, которые получаются в данной операции. Поверхности детали, выбранные как установочные базы в данной операции, обозначают условными знаками.

Содержание операции записывается в соответствующей графе операционной карты кратко в повелительном наклонении с указанием номера обработанной поверхности, например: «обточить поверхность 1 с подрезкой торца 2»; операционные размеры в тексте не пишутся. Одним из переходов каждой операции является контроль, что обязывает рабочего и контролера проверять исполнительные размеры и технические требования, указанные на операционном эскизе.

Для каждого основного перехода операции формообразования назначают параметры режима работы технологического оборудования. К числу таких параметров относятся: скорость резания, подача, глубина резания (для металлорежущих станков), усилие и температура прессования, время выдержки (для переработки пластмасс) и др.

Параметрами режима работы технологического оборудования во многом определяются такие показатели качества изделия, как точность размеров и шероховатость поверхностей, физико-механические и электрические и другие свойства. Для большинства операций обработки параметры режима работы технологического оборудования выбираются по справочникам, отраслевым и заводским нормалям, а в некоторых случаях устанавливаются опытным путем и вписываются в соответствующие операционные карты.

7. **Расчет ожидаемой точности обработки**. По принятой схеме установки детали в каждой операции определяется наличие или отсутствие погрешности базирования. В тех случаях, когда в схеме установки измерительная база детали не совмещена с установочной, всегда имеет место погрешность базирования. Следовательно, необходимо расчетом проверить соблюдение условия обработки без брака по операционному (исполняемому) размеру.

Исходными данными, используемыми при проектировании ТП, являются:

- конструкторская документация на изделие, включающая рабочие чертежи деталей;
- технические условия (ТУ), которые содержат требования к наиболее ответственным и сложным деталям и составляется обычно в тех случаях, когда все требования невозможно изложить в чертежах (назначение детали, методы контроля, общие сведения о хранении, транспортировке, клеймении);
- программа выпуска изделия, представляющая собой перечень наименований изготавливаемых или ремонтируемых изделий с указанием срока выполнения по каждому наименованию и объема выпуска, т.е. общего количества изделий определенного наименования и типоразмера;
- руководящие технические материалы;
- справочные данные об оборудовании, нормативы на припуски и операционные допуски;
- нормативы для технико-экономических расчетов.

В разработку ТП входит следующий комплекс взаимосвязанных работ:

- подбор оптимального варианта получения заготовки и разработка маршрутной технологии;
- подбор возможных типовых ТП;
- определение содержания вновь разрабатываемых технологических операций с установлением технологических баз;
- определение необходимого оборудования, оснастки, средств механизации и автоматизации производственного процесса;
- назначение и расчет режимов обработки, техническое нормирование процесса и определение необходимых профессий и квалификации рабочих;

- расчет и проектирование производственных участков, составление планировок и разработка операций перемещения изделий и отходов производства;
- выбор и назначение внутрицеховых подъемно-транспортных средств;
- оформление документации ТП на бланках, предусмотренных ЕСТД, и его утверждение.

Основными этапами проектирования **полного ТП** являются следующие:

- анализ технологичности изделия;
- проектирование ТП обработки деталей;
- проектирование ТП сборки;
- разработка технологии контроля;
- оформление технологической документации.

Основные этапы проектирования **частного ТП**:

- определение структуры процесса;
- выбор технологического оснащения процесса (оборудования, инструмента, оснастки, измерительной аппаратуры) с разработкой технического задания (ТЗ) и заказом нестандартного оснащения;
- расчет режимов обработки;
- расчет технических норм времени;
- выбор оптимального варианта ТП;
- оформление технологической документации;

Остановимся на анализе этапов проектирования частного ТП.

Проектирование ТП имеет целью дать подробное описание процессов изготовления изделий с необходимыми технико-экономическими расчетами и обоснованием выбранного варианта, так как ТП характеризуются своей многовариантностью. Из нескольких возможных вариантов ТП изготовления одного и того же изделия, равноценных с точки зрения технического принципа проектирования, выбирают наиболее эффективный и рентабельный вариант. При равной производительности сопоставляемых вариантов выбирают наиболее рентабельный, а при равных рентабельностях – наиболее производительный. Эффективность и рентабельность проектируемого ТП выявляют по всем элементам, из которых они складываются.

2.8.3. Этапы разработки частного технологического процесса

Первый этап проектирования частного ТП. Определение структуры процесса – это разбиение ТП на основные составляющие части (технологические операции).

Существует общее правило: чем больше годовая программа выпуска, тем на более мелкие операции следует «дробить» технологические процессы. Такие ТП называют дифференцированными в отличие от концентрированных, состоящих из малого числа крупных операций. Однако дробление, или дифференциация, не может быть чрезмерным, так как слишком простые операции (например, завинчивание одного винта) вызывают быструю утомляемость рабочего, потерю интереса к выполняемой работе и снижению производительности труда. Чрезмерная дифференциация требует значительного увеличения производственных площадей и вызывает значительные потери вспомогательного времени на транспортировку заготовок и т.п. (рис. 7).

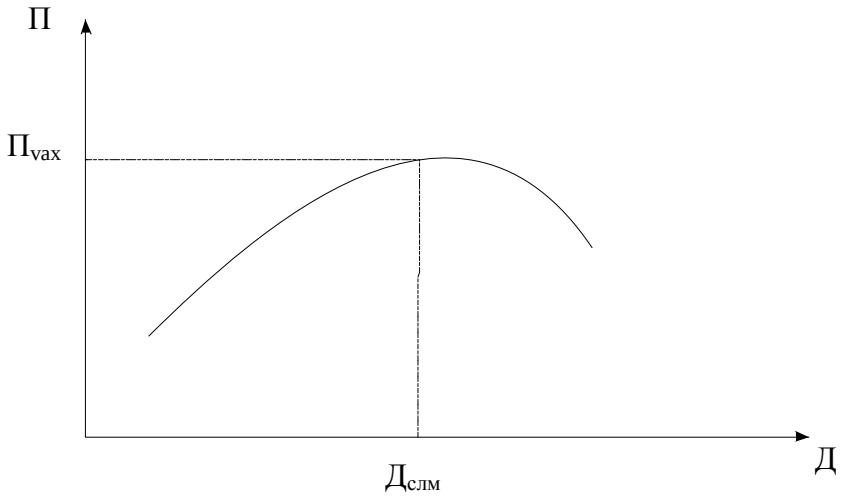


Рис. 7. Зависимость производительности (П)
от степени дифференциации (Д) технологического процесса

Рассмотрим, например, структуру ТП при изготовлении трансформатора с ферритовым магнитопроводом. При индивидуальном или опытном производстве (всего несколько штук в год) целесообразно построить структуру ТП из малого числа максимально крупных операций:

• слесарная – изготовление всех деталей трансформатора одним квалифицированным слесарем;

• намоточная – намотка всех электрических обмоток одним рабочим-намотчиком;

• сборочная – полная сборка всего трансформатора одним слесарем-сборщиком, возможно даже тем, кто изготавливал детали;

• контрольная – контроль всех электрических параметров трансформатора тем же рабочим, который выполнял намоточные операции.

Таким образом, весь ТП можно построить из четырех операций с двумя рабочими. При этом нет необходимости в применении специального высокопроизводительного технологического оборудования, конвейеров, организации поточного производства и т.п. Если же производство этих трансформаторов массовое (миллионы в год), то, очевидно, потребуется не два, а сотни или тысячи рабочих. При этом целесообразно поручить каждому рабочему одну мелкую операцию, которую он быстро освоит и будет производительно выполнять, при этом весь ТП будет состоять из десятков мелких операций, выполняемых последовательно (поточно). При этом окажется целесообразным приобретение (или изготовление) специального высокопроизводительного оборудования, конвейеров и т.п.

Основными факторами, определяющими степень дифференциации, являются характер производства и связанный с ним объем выпуска продукции. Чем выше серийность выпускаемой продукции и меньше ее номенклатура, тем на большее число операций можно расчленять процесс без лишнего усложнения планирования производства.

Последовательность операций и переходов намечают исходя из следующих основных положений:

1) последующие операции, переходы должны уменьшать погрешности и улучшать качество поверхности, полученной при предыдущей обработке;

2) сначала следует обрабатывать поверхность, которая будет служить установочной базой для последующих операций. Для установки детали при первой операции следует по возможности выбирать наиболее ровную и имеющую наибольшие размеры поверхность;

3) после обработки установочной поверхности заготовки в последующих операциях деталь базируется на нее или на поверхность, связанную с ней;

4) как правило, сначала обрабатываются менее точные поверхности;

5) операции, при которых возможно появление брака, следует приводить вначале;

6) отверстия нужно сверлить в конце ТП, за исключением тех случаев, когда они служат базами для установки.

Второй этап проектирования частного ТП. Выбор технологического оборудования определяется теми же соображениями: чем больше программа выпуска изделий, тем более высокопроизводительное и дорогое оборудование следует выбирать для разрабатываемого ТП. Более подробно правила выбора средств технологического оснащения ТП изложены в ГОСТ 14.301 ЕСТПП.

Третий этап проектирования частного ТП. Выбор средств технологического оснащения производится с учетом:

1) типа производства и его организационной структуры;

2) вида изделия и программы выпуска;

3) характера намеченной технологии;

4) возможности группирования операций;

5) максимального применения имеющейся стандартной оснастки и оборудования;

6) равномерной загрузки имеющегося оборудования.

При групповом методе обработки изделий выбор средств технологического оснащения определяется:

- общностью производимого вида обработки (сборки) по группам операций;
- составом операций группы, их суммарной трудоемкостью и повторяемостью;
- конструктивными и технологическими признаками обрабатываемых изделий или их элементов (размеры, марки материалов, форма, элементы базирования и пр.).

Четвертый этап проектирования частного ТП. Выбор технологического оборудования должен начинаться с анализа формирования типовых поверхностей деталей и сборочных единиц и отдельных методов их обработки с целью определения наиболее аффективных методов обработки исходя из назначения и параметров изделия.

Результаты анализа должны быть в виде :

- отношений основных времен;
- отношений штучных времен;
- отношений приведенных затрат на выполнение работ различными методами. Лучшим вариантом считается тот, значения показателей которого минимальные.

Выбор оборудования производят по главному параметру, являющемуся наиболее показательным для выбираемого оборудования, т.е. в наибольшей степени выделяющему его функциональное значение и технические возможности.

Оснащенность ТП для выпуска изделий в заданных количествах характеризуется коэффициентом технологического оснащения, который равен частному от деления количества специального оборудования, по данному изделию на количество оригинальных деталей в изделии.

Величина коэффициента технологического оснащения зависит от типа радиоаппарата (радиоприемник, приемо-передатчик, РЛС и др.), количества оригинальных деталей и годового задания (масштаба выпуска) и находится в пределах от 0,6 (для мелкосерийных изделий) до 3,5–4,0 (для изделий выпускаемых крупными сериями).

Проектирование и изготовление технологической оснастки (ТО) занимают около 80 % трудоемкости работ всей ТИП. Технологическая оснастка необходима для любого типа производства с той лишь разницей, что для массового и крупносерийного производства специальная оснастка увеличивается количественно и усложняется конструктивно, а для единичного и мелкосерийного производства ее количество ограничивается и делаются возможные конструктивные упрощения.

ЕСТПП устанавливает шесть систем технологической оснастки:

1) неразборную специальную (НСО);
2) универсально-наладочную (УНО);
3) универсально-сборную (УСО);
4) сборно-разборную (СРО);
5) универсально-безналадочную (УБО);
6) специализированную наладочную (СНО).

Неразборная специальная оснастка служит для выполнения определенных операций механической обработки одного типораз-

мера детали. Проектирование и изготовление этих приспособлений трудоемко и дорогостояще. Применяются в условиях крупносерийного, массового и частично серийного производства.

Универсально-наладочная оснастка (УНО) используется в серийном и мелкосерийном производстве при обработке на токарных, фрезерных, сверлильных и других станках сложных по форме деталей.

Универсально-сборная оснастка (УСО) компонуется из нормализованных деталей и сборочных единиц, входящих в ее комплект. Комплект содержит 1500–2500 базовых, опорных, установочных, направляющих, прижимных, крепежных и других деталей. Бригада из пяти слесарей может за год собрать из комплекта 2500 приспособлений. Нормализованные взаимозаменяемые детали и сборочные единицы УСО соединяют между собой с помощью шпонок, шпилек, болтов.

Основные детали УСО должны обладать большой износостойкостью, поэтому изготавливаются из легированной стали 12ХНЗА с последующей цементацией и закалкою.

В последнее время УСО получила широкое применение при производстве РЭС в связи с применением группового метода обработки. Наиболее эффективно ее применение в единичном и мелкосерийном производстве.

Система универсально-сборных оснасток обеспечивает:

- осуществление таких операций, где специальные приспособления нерентабельны;
- сокращение ручных разметочных операций;
- значительное упрощение проектирования приспособлений;
- уменьшение объема технологической документации;
- повышение культуры производства и развития инициативы инженеров и рабочих.

Сборно-разборная оснастка собирается из нормализованных и взаимозаменяемых деталей и узлов для однотипных деталей. Специальные детали в приспособлениях СРО составляют 20 % их общего количества. Применяют в мелкосерийном производстве для обработки группы деталей.

Универсально-безналадочная оснастка объединяет приспособления для закрепления деталей, объединенных общностью базо-

вых поверхностей и характером обработки. Они требуют только регулировки зажимных элементов (токарные патроны и т.п.).

Специализированной наладочной оснасткой называются приспособления, характеризующиеся применением смежных наладочных элементов и широко использующиеся при методе групповой обработки и применении типовой технологии, быстро переналаживаемые с обработки одной группы деталей на другую.

УБО покупается; **СРО** проектируется и изготавливается полностью на предприятии, ее проектирующем; **УСО** состоит в основном из комплектов покупных деталей и сборочных единиц; **УНО** в своей основе имеет покупные изделия с проектируемыми и изготавливаемыми к ним сменными элементами; **ОНО** состоит из базовой части оснастки и сменных элементов, проектируемых и изготавливаемых на предприятии; **НСО** проектируется и изготавливается самим предприятием для одной определенной операции.

При выборе ТО используется следующая документация:

- нормативно-техническая (стандарты на ТО и технологическое оборудование, термины и определения ТО);
- техническая (альбомы типовых конструкций оснастки, каталоги и паспорта на ТО, инструктивно-методические материалы по выбору ТО).

На основании разработанного ТП заказываются необходимые материалы, определяется загрузка оборудования, выполняется недостающее оборудование и изготовление приспособлений, составляются календарный планы работы цехов по выпуску деталей и передаче их на сборку.

Под технологической оснащенностью производства понимается способность производства удовлетворять требованиям заданного ТП.

Основными показателями технологической оснащенности являются:

- замкнутость производственного цикла в пределах участка, цеха, завода;
- выбор оптимальной кооперации между участками, цехами или заводами по постановке и совместной технологической обработке заданного изделия;
- максимальная автоматизация и механизация производственных процессов;

- непрерывное совершенствование оборудования и аппаратуры;
- введение современных методов обработки;
- типизация ТП и применение групповых методов при производстве РЭС.

Значительный выигрыш от правильной технологической оснащенности достигается в основном при крупносерийном или массовом производстве, в условиях мелкосерийного производства полная технологическая оснащенность не приводит к экономическому выигрышу, поэтому нужен не только расчет, но и экспериментальная проверка эффективности оснащения.

При теоретическом анализе технологической оснащенности производство рассматривается как сложная система – вводят комплексные критерии оценки качества оснащенности.

Как показывает анализ, оснастка плохо используется, а ведь именно она непосредственно «материализует» ТП, в наибольшей степени определяет и качество продукции, и гибкость производства, и его экономичность. Между тем 80 % инструментов относятся к разряду ручного применения. В серийном производстве опять-таки 80 % оснастки имеет специальное назначение – только для конкретного изделия.

До 90 % оснастки проектируется и изготавливается заново, что значительно удлиняет сроки технологической подготовки производства. Интенсивность использования ТО низка – она лежит на складах и морально стареет. Ежегодно списывают множество физически изношенных инструментов.

Единственный выход из этого положения – переход к переналаживаемой ТО. Необходимо обобщить все передовое, интересное по универсальной переналаживаемой оснастке, применять агрегатирование, оптимальный синтез оснастки на основе ЭВМ и САПР.

Создание и повсеместное внедрение универсальной переналаживаемой оснастки является одним из важнейших, определяющих факторов в решении задач развития гибких производственных систем.

Пятый этап проектирования частного ТП. Выбор измерительного инструмента и контрольных приспособлений.

Основные требования, предъявляемые к средствам измерения, – это точность, производительность и стоимость.

Выбор средств измерения зависит от сложности формы контролируемой детали, сборочной единицы, от характера измеряемых параметров и от типа производства. Рост производительности труда и высокая точность изготовления заставляют отказаться от субъективного контроля (несовершенство органов чувств и т.п.). Единственный путь – механизация и автоматизация контрольно-измерительных операций.

Необходимость механизации и автоматизации определяется еще и тем, что в условиях растущих масштабов производства с особой остротой встает задача предупреждения брака. При современных формах организации дифференцированного производства сам факт отбраковки негодной детали или сборочной единицы создает опасность срыва выпуска готовых изделий со сборки. Поэтому необходим такой контроль, который не только регистрировал бы фактические результаты производства, но и воздействовал бы на его ход, регулировал производственный процесс в заданном технологическом режиме.

В настоящее время существуют две основные формы контроля деталей – пассивная и активная.

Пассивная форма оправдывает себя в условиях нестабильного ТП, когда возможны случаи возникновения аварийного (статистически неопределимого) брака, или в условиях особой трудоемкости контрольных операций. Форму пассивного контроля применяют тогда, когда нет надобности в рассортировке их на группы размеров.

Наиболее низкая степень автоматизации активного контроля – непрерывное измерение детали в процессе обработки с помощью какого-либо показывающего прибора, например, индикатора. В этом случае рабочий не производит пробных измерений, а следит за показаниями приборов и выключает станок по достижении заданного размера. Более высокая степень автоматизации – управление рабочими органами станка по результатам измерения.

Таким образом, необходимо вводить в ТП значительное количество контрольных операций и оснащать их не только универсально-измерительным инструментом и предельными калибрами, но и контрольными приспособлениями.

Использование контрольных приспособлений обеспечивает объективность контроля, значительно сокращает время на выполнение контрольных операций.

В выборе (проектировании) приспособления для контроля данного параметра детали (сборочной единицы) должен быть учтен экономический фактор, т.е. эффективность применения проектируемого приспособления.

Очередной этап проектирования частного ТП – расчет режимов обработки, который должен выполняться так, чтобы обеспечить максимальную производительность труда при соблюдении нормативных сроков службы оборудования, другими словами: от оборудования нужно получить максимальную производительность, не допуская, однако, преждевременного износа.

Шестой этап проектирования частного ТП. Расчет технических норм времени производится для каждой технологической операции и имеет цель выровнять все операции по времени. Технические нормы времени выполнения каждой операции должны быть равны или кратны общему ритму технологического потока (времени изготовления одного изделия).

Техническая норма времени $T_{\text{тех}}$ рассчитывается по следующим формулам:

$$T_{\text{тех}} = T_{\text{пз}} + T_{\text{шт}};$$

$$T_{\text{шт}} = T_{\text{оп}} + T_{\text{обсл}} + T_{\text{пер}};$$

$$T_{\text{оп}} = T_{\text{осн}} + T_{\text{всп}},$$

где $T_{\text{пз}}$ – предварительно-заключительное время, необходимое рабочему для подготовки к предстоящей работе (изучение чертежей, получение инструмента, подготовка рабочего места, сдача чертежей и инструмента, уборка рабочего места и т.п.); $T_{\text{пз}}$ велико на индивидуальном и стремится к нулю при серийном и массовом производстве; $T_{\text{шт}}$ – штучное время, необходимое для изготовления одного изделия; $T_{\text{оп}}$ – операционное время, затрачиваемое на выполнение предусмотренных технологических операций; $T_{\text{обсл}}$ – время обслуживания рабочего места, $T_{\text{обсл}}$ = 1–7 % от $T_{\text{оп}}$; $T_{\text{пер}}$ – время коротких перерывов на естественные нужды (не включает обеденного перерыва). $T_{\text{пер}}$ рассчитывается в размере 2 % от $T_{\text{оп}}$; $T_{\text{осн}}$ – время, непосредственно затрачиваемое на выполнение технологической операции (время обработки); $T_{\text{всп}}$ – время, отводимое на вспомогательные работы при выполнении технологической операции (на-

пример, съем изделия с транспортного конвейера и постановка его обратно). Расчет по формулам ведется «снизу – вверх», начиная с расчета $T_{\text{осн}}$, затем $T_{\text{всп}}$ и т.д.

Если представить все время нахождения детали на производстве и принять эту величину за 100 %, то только 5 % этого времени деталь находится на обработке (остальное время она лежит, ожидая обработки) (рис. 8).

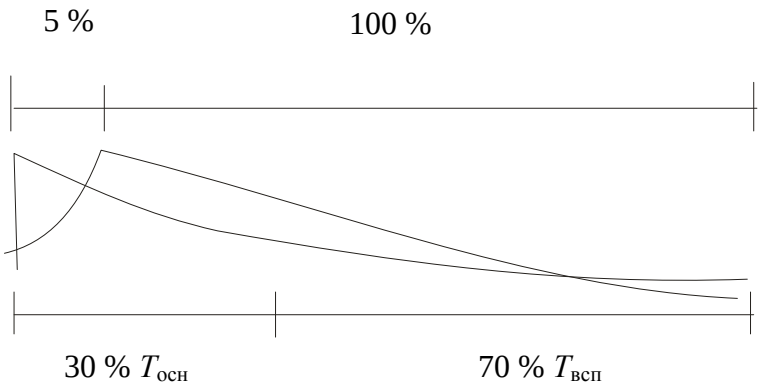


Рис. 8. Диаграмма распределения времени изготовления детали

Седьмой этап проектирования частного ТП. Проектирование технологических процессов сборки.

Проектирование процессов сборки имеет ряд особенностей, поскольку необходимо выбрать наиболее рациональные процессы и способы сборки, определить последовательность соединения деталей и частей, регулировки и контроля изделия (или частей его) с назначением оборудования, рабочих и измерительных инструментов.

Проектирование процесса сборки начинают с изучения и анализа конструкции по чертежам, схемам, ТУ и программе испытаний. В результате этого анализа должны быть установлены взаимосвязь частей изделия, условия их соединяемости и функционирования, определены процессы, оказывающие наиболее существенное влияние на качество изделия. После такого анализа конструкции разрабатывают маршрут (последовательность) сборки, последовательность и содержание каждой операции и оформляют технологическую документацию.

В заключении ТП сборки оценивается комплексом показателей, основные из них: удельный вес трудоемкости сборочных работ, длительность цикла сборки, степень разделения сборки на параллельные потоки, удельный вес механизированных операций,

выполняемых без подгонки, разборки, механической обработки и др. По этим показателям можно выбрать из нескольких вариантов процесса сборки изделия наилучший или сравнить ТП сборки данного изделия и других аналогичных ему по конструкции.

По ГОСТ 2.101–68 ЕСКД все независимо собираемые части изделия называют сборочными единицами.

Необходимость расчленения изделия на сборочные единицы определяется в первую очередь условиями работы и эксплуатации, возможностью изготовления и соединения деталей.

Количество сборочных единиц в изделии определяет возможности сокращения трудоемкости и длительности (цикла) сборки за счет создания условий для выполнения сборочных операций, разделения процесса сборки на параллельные потоки, автоматизации и механизации процесса, т.е. разделяют на сборочные единицы еще и из технологических соображений.

Процесс сборки сложных изделий состоит из переходов, выполняемых не только последовательно друг за другом, но и параллельно. Последовательность (или маршрут) такого процесса может быть представлена графически, в виде схем. Схема должна как можно более точно отображать ТП сборки.

Первый этап процесса проектирования сборки – построение схем процесса сборки с определением переходов и оптимальной последовательности их выполнения. Исходными материалами для этого служат сборочные чертежи и технические условия, выполненные согласно ГОСТам ЕСКД.

Восьмой этап проектирования частного ТП. Выбор оптимального варианта ТП является одним из важнейших этапов разработки частного ТП. Обычно разрабатывается несколько возможных вариантов ТП, из которых выбирается оптимальный. Приведем один из простейших способов выбора оптимального варианта ТП по критерию себестоимости.

Себестоимость изделия слагается из себестоимости применяемых материалов, зарплаты производственных рабочих и суммы косвенных затрат, исчисляемых в процентах к зарплате.

При выборе варианта ТП нужно определить лишь ту часть себестоимости, величина которой зависит от варианта ТП.

Себестоимость сборочной операции:

$$C_{\text{оп}} = \frac{T_{\text{шт}}}{60} l\left(1+\frac{Z_{\text{н}}}{100}\right) + \sum C_{\text{э о}} + \sum C_{\text{а о}} + \sum C_{\text{и}} + \sum C_{\text{п}},$$

где $T_{шт}$ – норма штучно-калькуляционного времени (мин); l – часовая ставка рабочего, $Z_н$ – процент начислений на производственную зарплату; $C_{э\,о}$ – эксплуатация оборудования; $C_{а\,о}$ – амортизация оборудования, $C_и$, $C_п$ – эксплуатация и отчисления на амортизацию инструмента и приспособления.

Себестоимость всего процесса сборки находится как сумма себестоимостей всех операций. Себестоимость партии N изделий

$$C_N = a + bN,$$

где a – единовременные затраты на программу выпуска (затраты на покупку, установку и наладку оборудования для производства всей партии); b – текущие расходы на изготовление каждой единицы изделия; N – годовая программа выпуска.

Из двух технически равноценных вариантов ТП следует выбирать ТП с наименьшей себестоимостью.

Обозначим себестоимости для двух ТП:

$$C_1 = a_1 + b_1;$$
$$C_2 = a_2 + b_2.$$

Эти выражения представляют собой уравнения прямых. Обозначив эти зависимости на графике, получим точку пересечения A и соответствующее ей критическое значение годовой программы $N_{кр}$ (рис. 9).

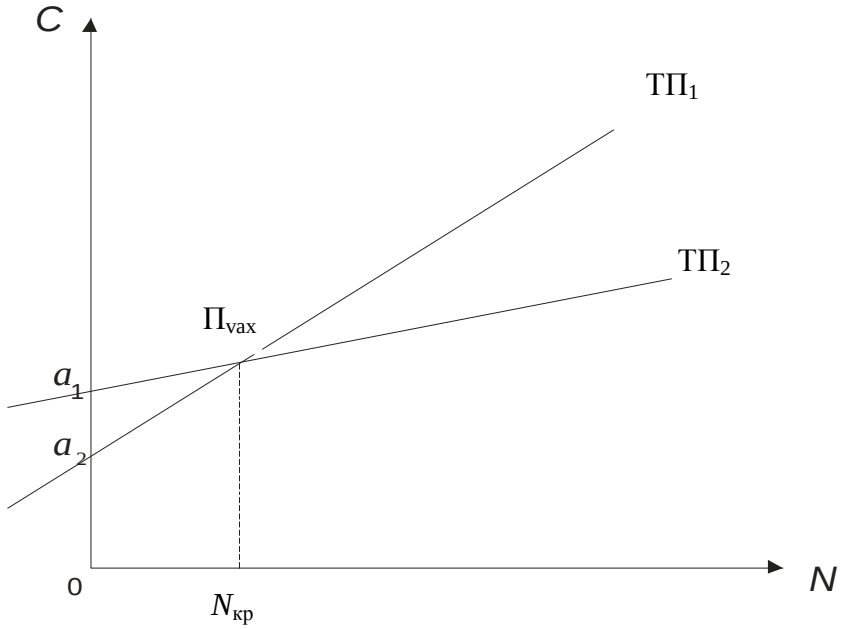


Рис. 9. Иллюстрация метода выбора оптимального варианта ТП

При $N < N_{кр}$ годовая себестоимость меньше для первого варианта ТП, и наоборот. Экономический эффект от снижения себестоимости при выборе рационального варианта ТП для некоторой годовой программы выражается разностью себестоимостей (см. рис. 9).

Если число технологических процессов более двух, то осуществляют попарное сравнение. Однако следует учесть, что коэффициент a в течение года может изменяться – покупка дополнительного оборудования (ступени), и b также изменяется за счет роста сноровки и опыта рабочих (график перестает быть прямолинейным – появляются криволинейные участки).

Выбор оптимального варианта по сложным (комплексным) критериям, учитывающим не только себестоимость, но и другие технико-экономические показатели, осуществляется с помощью ЭВМ по сложной методике. В основу проектирования любого ТП положены два принципа: технический и экономический. В соответствии с первым ТП должен обеспечивать выполнение всех требований ТЗ и ТУ на изготовление данного изделия. В соответствии со вторым требованием при изготовлении изделия должны обеспечиваться наибольшая производительность труда и наименьшая себестоимость.

Проектирование ТП имеет целью дать подробное описание процессов изготовления изделий с необходимыми технико-экономическими расчетами и обоснованием выбранного варианта, так как ТП характеризуется своей многовариантностью.

ТП разрабатываются при проектировании новых и реконструкции старых действующих предприятий, а также при организации производства новых изделий на действующих предприятиях. При этом принятые варианты являются основой на всех стадиях технико-экономических расчетов и проектных решений. Кроме того, ТП разрабатываются и корректируются на условиях действующих предприятий при выпуске освоенной продукции. Это вызывается непрерывными конструктивными усовершенствованиями изделий, необходимостью систематического использования и внедрения в действующее производство достижений науки и техники, разработки и проведения организационно-технических мероприятий, необходимостью ликвидации «узких» мест производства.

ГОСТ 14.303–78 ЕСТГШ устанавливает исходную информацию для разработки типовых технологических процессов, которая подразделяется на базовую, руководящую и справочную.

Базовая информация включает данные, содержащиеся в конструкторской документации на изделие и программу выпуска этого изделия.

Руководящая информация включает данные, содержащиеся:

- в стандартах всех уровней на ТП и методы управления ими, оборудование и оснастку;
- в документации на перспективные ТП;
- в производственных инструкциях.

Справочная информация включает данные, содержащиеся:

- в документации на действующие типовые ТП по данному виду обработки;
- в описаниях прогрессивных методов обработки;
- в каталогах, номенклатурных справочниках прогрессивного технологического оборудования и оснастки;
- в материалах по выбору технологических нормативов (режимов обработки, припусков, норм расхода материалов и т.п.);
- в прогнозах научно-технического прогресса и планах повышения технического уровня производства;
- в методических материалах по управлению и расчетам точности ТП.

Десятый этап проектирования частного ТП. Оформление технической документации является заключительным этапом разработки частного ТП.

Оформление документации на разрабатываемый ТП производится в соответствии с ЕСТД на стандартных технологических картах и бланках.

Следует напомнить, что КПП подразделяется на ряд последовательных стадий:

- техническое задание – определение основного назначения, технических и тактико-технических данных, показателей качества и т.п.;
- техническое предложение – анализ ТЗ и разработка различных вариантов построения изделия;
- эскизный проект – разрабатываются конструкторские документы, содержащие данные об устройстве и его назначении, принципе работы и т.п.;

• технический проект – разработка электрических и структурных схем, чертежей сложных устройств и их габаритные, конструкторские технические характеристики, расчеты надежности и т.п. Документам присваивается литера Т;

• разработка технической документации включает выполнение рабочих чертежей с ТУ;

• изготовление и испытание опытного образца – отработка и корректирование рабочих чертежей для запуска их в серийное производство.

На стадии разработки конструкторской документация, технического задания и технического предложения технологическую документацию допустимо не разрабатывать.

Разработка технологической документации на стадии «предварительный проект» производится с литерой П и соответствует стадиям разработки конструкторской документации «эскизный проект» и «технический проект». Предварительный проект содержит перечни специальных и типовых ТП, технических заданий на разработку специального технологического оборудования. Следует напомнить, что на стадии «опытное производство» технологическим документам присваивается литера О, на стадии «установочная серия» дается литера А, а на стадии «серийное производство» – литера Б.

На стадии разработки рабочей документации опытного образца производится проектирование технологической документации для изготовления и испытания образца.

Согласно ГОСТ 3.1105–74 «Правила оформления технологической документации» вся технологическая документация подразделяется на следующие виды:

1. Маршрутная карта (МК) служит для записи всех операций изготовления деталей без их разделения на переходы с указанием данных об оборудовании, оснастке, материальных и трудовых нормативах.

2. Операционная карта (ОК) предназначена для подробного описания одной операции со всеми переходами, режимами обработки и данными о средствах технологического оснащения. В зависимости от характера производства и выполняемых работ операционная карта разрабатывается отдельно на процессы механической обработки, слесарно-сборочных, сборочных и электромонтажных работ, технического контроля и др. При этом форма ОК имеет определенный вид.

3. Карта типового ТП (КТТП) содержит подробные сведения о выполнении операций с указанием переходов, данные о средствах технологического оснащения и материальных нормативах для определенного технологического типа.

4. Операционная карта (ОКТ) содержит описание типовой технологической операции с указанием переходов, а также данные о технологическом оборудовании, оснастке (при необходимости) и режимах обработки.

5. Карта эскизов и схем (КЭ) содержит графические иллюстрации (эскизы, схемы, таблицы), необходимые для выполнения ТП, операции или переходы, включая контроль и перемещение.

6. Технологическая инструкция (ТИ) содержит описание приемов работы или ТП изготовления изделия, правил эксплуатации технологического оборудования и оснастки, описание физических и химических явлений, возникающих при выполнении отдельных операций или переходов.

7. Карта технологического процесса (КТП) предназначена для описания процесса изготовления изделия по всем операциям одного вида работ, выполняемых в одном цехе в технологической последовательности, с указанием данных об оснащении, материальных и трудовых нормативов.

8. Комплектовочная карта (КК) содержит данные о деталях, сборочных единицах и материалах, входящих в комплект собираемого узла.

9. Ведомость расцеховки (ВР) содержит данные о маршруте прохождения изготавливаемого изделия по службам предприятия.

10. Ведомость оснастки (ВО) содержит перечень технологической оснастки, необходимой для выполнения данного ТП.

11. Ведомость материалов (ВМ) содержит данные о заготовках, нормах расхода материала, маршруте прохождения изготавливаемого изделия.

12. Ведомость деталей (сборочных единиц) к типовому ТП (ВТП) содержит перечень деталей (сборочных единиц), изготавливаемых по типовому ТП, с указанием соответствующих данных о трудовых нормативах, а также материалах, технологической оснастке и режимах работы.

13. Ведомость технологических документов (ВТД) содержит перечень и описание всех операций технического контроля, выпол-

няемых в одном цехе в технологической последовательности, с указанием данных об оборудовании, оснастке и требованиях к конструкторским параметрам.

Маршрутная карта, карта технологического процесса, ведомость деталей к типовому ТП и операционная карта являются основными документами в комплекте технических документов на изделие (табл. 3).

Таблица 3

Виды технологических документов и этапы их разработки

Обозначения документов	Стадии ТПП и их обозначение			
	Предварительный проект (П)	Опытное производство (О, $О_1$)	Установочная серия (А)	Установившееся производство (Б)
МК	0	+	+	+
ОК	0	0	0	0
КЭ	–	0	0	0
ТИ	0	0	0	0
КТП	0	0	0	0
ВО	–	0	0	+
ВМ	–	0	0	+
ВТП	0	0	0	0
ВТД	0	0	+	+
Т	0	0	0	0

Здесь приняты следующие условные обозначения:

Т – прочие технологические документы; «+» – разработка обязательна; 0 – разработка необязательна; «–» – не разрабатывается.

При оформлении технологической документации необходимо придерживаться следующих правил:

- наименование операции записывается в форме прилагательного в именительном падеже (сверлильная, сборочная, регулировочная и т.п.);
- наименование переходов записывается в виде глаголов в неопределенной форме (точить, замерить и т.д.);
- переход должен содержать точные и конкретные действия рабочего;

• контрольные операции указываются после наиболее важных операций или переходов с указанием контролируемых параметров и количества деталей, подлежащих контролю;

• каждый ТП изготовления деталей или сборки узла должен быть снабжен титульным листом.

2.8.4. Конструкторско-технологическая система обозначения технологических документов

Каждому разработанному и выпускаемому документу должно быть присвоено самостоятельное обозначение. Если документ на нескольких листах, то все листы должны иметь одинаковое обозначение.

Устанавливается многоаспектная классификационная система обозначения документов по следующей структуре (рис. 10).

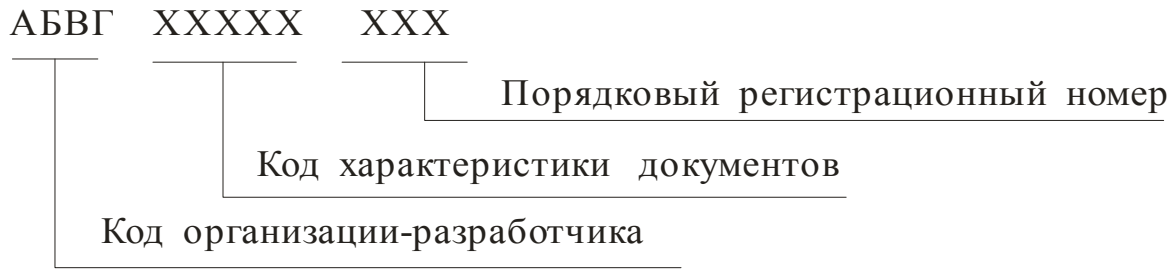


Рис. 10. Классификационная система обозначения документов

Код организации-разработчика присваивают по Общероссийскому классификатору предприятий и организаций.

Устанавливаются следующая структура и длина кода характеристики документа (рис. 11).

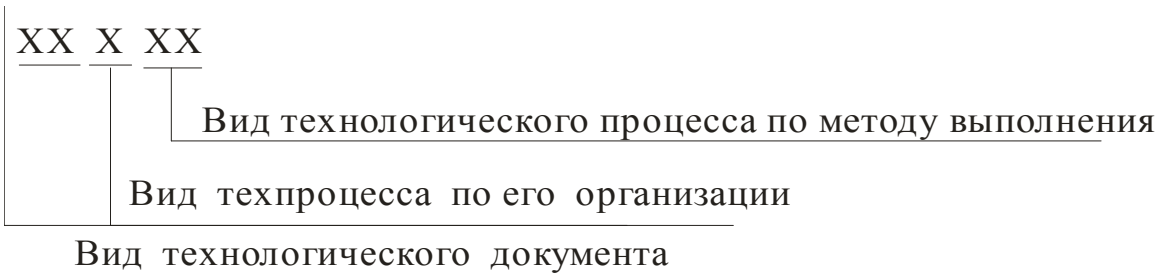


Рис. 11. Код характеристики документа

На следующих трех таблицах (табл. 4–6) приведены примеры кодировок технологических документов.

Таблица 4

Кодировка видов технологических документов

КОД	ВИД ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ДОКУМЕНТА
10	Маршрутная карта
20	Карта эскизов
25	Технологическая инструкция
30	Комплектовочная карта
40	Ведомость документов
42	Ведомость оснастки
43	Ведомость материалов
44	Ведомость деталей (сборочных единиц)
50	Карта технологического процесса
60	Операционная карта

Таблица 5

Кодировка видов технологических процессов (операций)

КОД	ВИД ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА (ОПЕРАЦИИ)
0	Без указания
1	Единичный процесс (операция)
2	Типовой процесс (операция)
3	Групповой метод (операция)

Таблица 6

Кодировка видов технологических процессов по методу выполнения

КОД	ВИД ТП ПО МЕТОДУ ВЫПОЛНЕНИЯ
1	2
01	ТП изготовления изделия
02	Ремонт
03	Технический контроль
04	Перемещение
05	Складирование
06	Раскрой и отрезка заготовок
10	Литье
11	Литье в песчаные формы
12	Литье в металлические формы
13	Литье в оболочковые формы
14	Литье по выплавляемым моделям

Окончание табл. 6

1	2
30	Холодная штамповка
40	Механическая обработка
46	Обработка на станках с ЧПУ
50	Термическая обработка
60	Изготовление деталей из пластмасс
65	Изготовление деталей порошковой металлургией
70	Нанесение защитного и защитно-декоративного покрытия
75	Электрофизическая обработка
80	Пайка

Современная конструкторская классификация способствует созданию деталей с высокими показателями унификации и стандартизации, сокращению номенклатуры, быстрому тематическому поиску деталей с применением ЭВМ. Применяют конструкторские, технологические и конструкторско-технологические классификации.

При этом рассматриваются следующие признаки:

1) геометрическая форма;
2) конструктивная характеристика отдельных элементов;
3) взаимное расположение элементов;
4) параметр;
5) выполняемая деталью функция;
6) наименование;
7) размерная характеристика;
8) группа материала;
9) вид детали по технологическому процессу;
10) вид исходной заготовки;
11) класс точности;
12) класс шероховатости;
13) характеристика технологических требований;
14) дополнительная информация;
15) весовая характеристика.

Первые шесть признаков используются для классификации по конструктивным признакам, остальные – по технологическим.

В соответствии с ЕСКД устанавливается единая классификационная система обозначения чертежей деталей и сборочных единиц со следующей структурой кодирования (рис. 12).

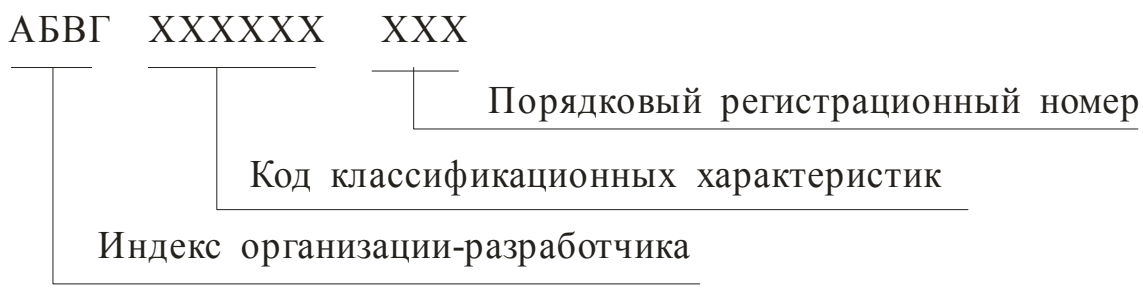


Рис. 12. Классификационная система обозначения чертежей деталей и сборочных единиц

Основная роль классификационной характеристики состоит в том, что она определяет образ изделия и его основные функциональные и конструктивные особенности.

Классификация осуществляется по десятичному иерархическому признаку с пятью уровнями деления. Каждый класс делится на девять подклассов, групп, подгрупп, видов. Для кодирования используют цифры 1–9.

Все детали машино- и приборостроения систематизируются в самостоятельные классы. В 1972 г. издан классификатор деталей общемашиностроительного применения, в котором для классификации деталей выделены два класса: 40 – тела вращения; 50 – кроме тел вращения.

Систематизация деталей производится на основе шести первых признаков, характеризующих наиболее существенные свойства деталей. Например, геометрическая форма детали является основным признаком при ее описании, а два следующих признака конкретизируют ее.

Следующим звеном классификационного обеспечения подготовки производства является общероссийская система технологической классификации и кодирования деталей, которая базируется на сочетании классификатора ЕСКД и технологического классификатора деталей машиностроения и приборостроения. Цель технологических классификаций – создание базы для разработки и поиска типовых ТП с помощью ЭВМ на основании группирования деталей по их конструктивно-технологическому подобию.

В системе ЕСТПП рекомендован к применению единый технологический классификатор – как бы логическое продолжение конструкторского классификатора. Ныне разработана единая конструкторско-технологическая классификация деталей, которая основана на независимой классификации деталей по нескольким признакам, использующим конструктивно-технологические характеристики, совместно определяющие их технологическое подобие. Разработана 14-значная структура технологического кода с закреплением определенной позиции и определенного числа знаков за каждым признаком общности.

Код состоит из двух частей: постоянной и переменной. Постоянная часть формируется на основных признаках технологической классификации и состоит из шести знаков. В качестве основных признаков приняты: размерная характеристика (ХХХ), группа материала (ХХ) и вид детали по ТП (Х), определяющий код (номер) переменной части общего технологического кода. Переменная часть является в свою очередь кодом классификационных группировок признаков общности применительно к виду детали по ТП и состоит из восьми знаков. Например, для обработки резанием: вид исходной заготовки (ХХ), квалитет точности размеров наружных поверхностей (Х), квалитет точности размеров внутренних поверхностей (Х), класс шероховатости наружних поверхностей (Х), характеристика элементов зубчатых зацеплений (Х), характеристика термической обработки (Х), характеристика массы (Х).

В соответствии с классификационными группировками признака «Вид детали по ТП» имеется семь разделов, в которых представлена технологическая классификация семи видов деталей: 1) литых; 2) изготовленных ковкой и горячей штамповкой; 3) изготовленных холодной штамповкой; 4) обработка резанием; 5) термическая обработка; 6) с покрытием; 7) изготовляемых переработкой полимерных материалов. Номера видов деталей с 1 до 7 соответствуют последней цифре постоянной части технологического кода.

Таким образом, конструкторско-технологическая характеристика деталей имеет вид:

ХХХ ХХХ	ХХХХХХ. ХХХХХХХХ
Код классификационных группировок конструкторских признаков (классы 40, 50)	Технологический код детали

При обозначении чертежа добавляют индекс разработчика и порядковый номер детали.

Приведенная структура является универсальной.

Технологическая классификация играет важную роль при группировании деталей для разработки типовых ТП, выбора оборудования, специализации производства, анализа производственной структуры и т.д., а также при решении задач подготовки производства с применением ЭВМ.

2.9. Анализ и расчет технологичности конструкции изделия

2.9.1. Основные показатели технологичности

Основными показателями РЭС являются уровень комплексной миниатюризации и уровень технологичности. Под технологичностью конструкции следует понимать совокупность свойств изделий, позволяющих оптимально использовать средства, материалы и время при технической подготовке производства, изготовления, эксплуатации и ремонте, по сравнению с соответствующими показателями однотипных конструкций изделий того же назначения. Технологичность – это свойство изделия, обеспечивающее наиболее быстрые и экономичные подготовку производства и выпуск этого изделия.

Анализ технологичности – это технологический контроль конструкторской разработки нового изделия. В процессе подготовки производства должна обеспечиваться максимальная технологичность конструкции деталей, узлов и изделия в целом применительно к конкретным условиям и масштабам производства.

Технологичность не следует путать с конструктивностью.

Конструктивность детали – это такое ее конструктивное оформление, которое при минимальных затратах на материал обеспечивает выполнение деталью ее назначения в объекте на протяжении расчетного срока службы.

Конструктивность узла – такое его конструктивное оформление, которое, будучи выполнено по наиболее простой кинематической или электрической схеме и притом из наименьшего количества конструктивно оформленных деталей, обеспечивает выполнение

узлом его функций. В противоположность технологичности конструктивность почти не зависит от размеров выпуска. Конструкция изделия, разработанного применительно к условиям индивидуального производства, обычно оказывается нетехнологичной при переходе к серийному и тем более массовому производству.

Технологичность конструкции во многом определяется:

- снижением трудоемкости механообработки;
- применением микросхем, микросборок, применением пластмасс с использованием прогрессивных методов формообразования;
- экономией металлов;
- использованием базовых несущих конструкций;
- повышением уровня унификации и стандартизации;
- обеспечением автоматизации и механизации операций контроля и настройки печатных плат и узлов.

Важнейшими факторами, определяющими технологичность, являются:

- количество деталей в конструкции и их распределение по конструктивному назначению;
- конструктивные формы деталей;
- количество применяемых марок и типоразмеров материалов, их расход на изделие и использование;
- рациональное расчленение изделия на сборочные единицы.

Все указанные факторы непосредственно влияют на объем работ по ТПП, на длительность цикла подготовки производства, на размеры затрат по ее осуществлению. Поэтому каждая новая конструкция должна обладать определенными показателями, характеризующими ее соответствие прогрессивным направлениям в технологии и организации производства.

Наиболее наглядно показатели технологичности можно проиллюстрировать на основе критериев технологичности Бородачева, которые являются мерами повышения уровня технологичности. Всего предусматривается шесть показателей технологичности Бородачева:

1) общее число деталей в изделии (чем больше общее число деталей в изделии, тем ниже технологичность);

2) число наименований деталей (чем больше общее число наименований деталей в изделии, тем ниже технологичность);

3) удельный вес стандартных, нормализованных и ранее освоенных в производстве деталей (чем больше общее число наименований деталей в изделии, тем выше технологичность);

4) распределение деталей по классам точности (чем выше класс точности обработки деталей в изделии, тем ниже технологичность);

5) распределение деталей по видам обработки (чем больше прогрессивных видов обработки, тем выше технологичность);

6) показатели сборки:

а) удельный вес деталей, предварительно собираемых в сборочные единицы (чем больше удельный вес деталей, предварительно собираемых в сборочные единицы, тем выше технологичность);

б) удельный вес деталей, требующих подгонки и регулировки в процессе сборки (чем больше удельный вес деталей, требующих подгонки и регулировки в процессе сборки, тем ниже технологичность).

Технологичность как экономический показатель конструкции изделия имеет значение для всех без исключения стадий ТП, вплоть до упаковки готовой продукции. Каждый ТП обладает специфическими особенностями, которые должны быть учтены конструктором при его совместной работе с технологом, чтобы при минимальных материальных и трудовых затратах спроектировать отвечающую своему назначению продукцию.

Изделие, как и любой продукт труда, предназначенный для удовлетворения определенных потребностей, обладает свойствами, образующими его качество. Под свойством понимается объективная способность изделия проявлять в определенной степени свое качество по отношению к другим объектам, с которыми оно вступает во взаимодействие.

Конструктор, придавая конструкции изделия в процессе ее разработки необходимые свойства, выражающие полезность изделия, придает ей и такие конструктивные свойства, которые предопределяют уровень затрат ресурсов на создание, изготовление, техническое обслуживание и ремонт изделия.

Совокупность свойств изделия, определяющих приспособленность его конструкции к достижению оптимальных затрат ресурсов при производстве и эксплуатации для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ, представляет собой **технологичность конструкции изделия (ТКИ)**.

ТКИ выражает не функциональные свойства изделия, а его конструктивные особенности. Конструкцию изделия характеризуют в общем случае состав и взаимное расположение его составных частей, схема устройства изделия в целом, форма и расположение поверхностей деталей и соединений, их состояние, размеры, материалы и информационная выразительность. Поэтому для изделия следует применять термин «технологичность конструкции изделия».

Таким образом, под технологичностью изделия (конструкции) понимают совокупность свойств конструкции изделия, проявляемых в возможности оптимальных затрат труда, средств, материалов и времени при технологической подготовке производства (ТПП), изготовлении, эксплуатации и ремонте по сравнению с соответствующими показателями однотипных конструкций изделий того же назначения при обеспечении установленных значений показателей качества и принятых условий изготовления, эксплуатации и ремонта.

Рассмотрим свойства изделия, характеризующие его качество. Качество изделия наряду с технологичностью конструкции характеризуется в общем случае также его функциональностью (способностью изделия реализовывать основную функцию для достижения заданного технического эффекта), надежностью, эргономичностью, эстетичностью, экономичностью, безопасностью и экологичностью.

Перечисленные грани качества изделия обусловлены в значительной мере его конструктивным исполнением, которое в свою очередь определяет технологичность конструкции изделия в целом.

Связь технологичности с другими свойствами конструкции изделия реализуется в сферах ее проявления в форме разрешения противоречий между активными элементами технологического процесса – человеком и используемыми им орудиями труда, с одной стороны, и противодействующим элементом – предметом труда (изделием, его моделью или заготовкой) – с другой.

Следует различать три вида противодействий изделия, его модели или заготовки активным элементам процессов изготовления, эксплуатации и ремонта: субстантные, обусловленные материально-вещественным содержанием изделия; структурные, вызванные особенностями конструктивной формы его исполнения; функциональные, связанные с разнообразием условий выполнения работ при придании изделию определенной формы или содержания в процессах изготовления, а также при поддержании или восстановлении его качества в процессах эксплуатации или ремонта.

Субстантные противодействия изделия прежде всего проявляются в элементарных сопротивлениях: его веса – различным пе-

ремещениям; свойств его материала – резанию или давлению; его массы, через инерционные силы – выполнению некоторых механических и сборочных работ и т.п.

Структурные противодействия изделия активным элементам процессов изготовления, эксплуатации и ремонта обусловлены сложностью конструкции и ее элементов, расположением и доступностью для обработки, жесткостью конструкции, числом составных частей и т.п.

Функциональные противодействия изделия условиям выполнения работ в различных сферах определяются объемом выпуска изделий и типом производства, его регулярностью и стабильностью, а также специфическими требованиями к конструкции изделия, соблюдение которых вызвано необходимостью придания изделию определенных свойств эстетичности и эргономичности и соблюдения требований техники безопасности, производственной санитарии и охраны окружающей среды.

При анализе процессов разработки конструкции изделия учитывается их взаимосвязь со сферами проявления ее свойств, включая научные исследования и разработки новых процессов, технологических методов и средств, процессы производства, эксплуатации и ремонта изделия (рис. 13).



Рис. 13. Структура взаимосвязи процессов разработки конструкции изделия со сферами проявления ее свойств

Определим взаимозависимость технологичности с основными характеристиками конструкции.

ТКИ и функциональность изделия. Показатели назначения (технического эффекта) характеризуют соответствие изделия условиям реализации его основных функций. Их соотношение с затратами всех видов ресурсов определяет эффективность создаваемой и эксплуатируемой техники. В ряде случаев способность изделия выполнять свои основные функции непосредственно определяется его конструктивным исполнением. Это накладывает существенное ограничение на выбор технологически рациональных инженерных решений, принимаемых по конструкции изделия в период его разработки. Но и в этих случаях возможна многовариантность решений, а следовательно, и выбор наиболее рационального из них.

ТКИ и надежность изделия. Требования к надежности (безотказности, долговечности, ремонтопригодности и сохраняемости) направлены на обеспечение выполнения изделием заданных функций в эксплуатации путем сохранения во времени и в установленных пределах значений всех параметров, характеризующих способность выполнять эти функции в определенных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования. Реализация этих требований в конструкции изделия влечет за собой трудовые, материальные и энергетические затраты на производство изделия, поддержание и восстановление его работоспособности в процессе технического обслуживания и ремонта и поэтому должна сопровождаться мероприятиями по обеспечению ТКИ.

Следует также учитывать непосредственную связь показателей надежности с показателями ТКИ. Например, коэффициент нормирования надежности зависит от затрат на планово-профилактические работы за срок службы изделия, общая величина затрат связана с числом отказов изделия в процессе его функционирования и т.п.

ТКИ и эргономичность изделия. Эргономические свойства конструкции изделия аналогично свойствам, образующим ТКИ, проявляются как при производстве, так и при эксплуатации изделия в результате функционирования сложной эрготической системы вида «человек – предмет труда» или «человек – изделие».

При проектировании изделий также учитывается необходимость взаимосвязанного выполнения мероприятий по приданию конструкции изделия свойств эргономичности и технологичности.

ТКИ и эстетичность изделия. Художественно-конструкторское решение формы исполнения изделия органически связано с обеспечением ТКИ, поиском оптимального (подуровня затрат) сочетания рациональных в эстетическом отношении конструктивных форм изделия и технологически рационального конструктивного исполнения изделия и его составных частей.

Придание конструкции изделия эстетически и технологически рациональных форм – двуединая задача процесса конструирования. Мероприятия по обеспечению ТКИ в данном случае проводятся в объеме, продиктованном необходимостью придания конструкции изделия эстетических свойств.

ТКИ и экономичность изделия. Под экономичностью изделия следует понимать способность изделия выполнять заданные функции при использовании выделенных для его функционирования материальных, энергетических и других ресурсов в объемах, соответствующих установленным для этой цели нормам. В состав этих ресурсов не включаются оперативные затраты на техническое обслуживание и ремонт изделия, характеризующие эксплуатационную технологичность его конструкции. В этом состоит существенное отличие экономичности изделия от эксплуатационной ТКИ. Однако ресурсы, затрачиваемые в первом и втором случаях, входят в сумму общих эксплуатационных затрат на функционирование изделия и поддержание его в работоспособном состоянии, что важно учитывать при расчете обобщенного показателя качества изделия.

В то же время для качественной характеристики ТКИ не следует применять термин «экономичность конструкции изделия», поскольку экономичность является общей характеристикой функционирующего изделия.

ТКИ и безопасность изделия. Техника, разрабатываемая человеком, находится с ним в постоянном взаимодействии, поэтому наряду с удовлетворением его потребностей по рассмотренным выше свойствам она должна быть безопасной при изготовлении, транспортировании, хранении, монтаже, подготовке к функционированию, техническом обслуживании, ремонте и утилизации, т.е. во всех сферах, в которых проявляется ТКИ. Придавая конструкции изделия свойства, составляющие ее технологичность, необходимо учитывать, что конструкция является одновременно носителем свойств безопасности изделия.

ТКИ и экологичность изделия. Уровень вредных воздействий техники на окружающую среду, возникающих при ее производстве, эксплуатации и ремонте, зависит от принимаемых при разработке конструкции изделия инженерных решений по используемым для его изготовления, функционирования и восстановления рабочим материалам, способам их переработки, применению в конструкции защитных устройств и т.п. Эти решения непосредственно воздействуют на затраты ресурсов во всех областях проявления ТКИ, поэтому обеспечение ТКИ и устойчивости экологической системы, во взаимодействии с которой изделие должно проявлять свои свойства, следует также рассматривать как комплексную задачу создания изделия высокого качества.

Ко многим видам изделий предъявляются требования по транспортабельности. Транспортабельность изделия характеризует его приспособленность к перемещению в пространстве, не сопровождающемуся использованием изделия, а также к подготовительным и заключительным операциям, связанным с транспортированием изделия в сферах его производства, эксплуатации и ремонта. Факторы, определяющие транспортабельность изделия (масса и объем изделия, его габаритные размеры, режимы, перемещения, восприимчивость к внешним воздействиям), существенно влияют на размеры затрат труда, материалов и энергии при заданных условиях выполнения работ во всех сферах проявления ТКИ. Поэтому обеспечение транспортабельности изделия следует рассматривать как составную часть работ по обеспечению ТКИ.

Учет технологических требований к конструкции изделия. Взаимосвязь ТКИ с другими свойствами, характеризующими качество изделия, отражает единство противоречивых сторон в изделии как продукте труда, обусловленных противоречиями между активными элементами производства, эксплуатации и ремонта и противодействующим элементом – изделием. Эти внутренние противоречия выступают источником непрерывного развития и совершенствования конструкции изделия, учитываются при его проектировании и разрушаются (минимизируются) реализацией конкурентного равновесия между техническими требованиями к качеству изделия и технологическими требованиями к условиям его эксплуатации и ремонта в условиях оптимальности по Парето. Такая оптимизация является обязательной при определении базовых показателей ТКИ.

2.9.2. Общая классификация технологичности конструкции изделия

Классификация ТКИ по методу воздействия на конструкцию изделия, области проявления ТКИ и виду затрат приведена на рис. 14.

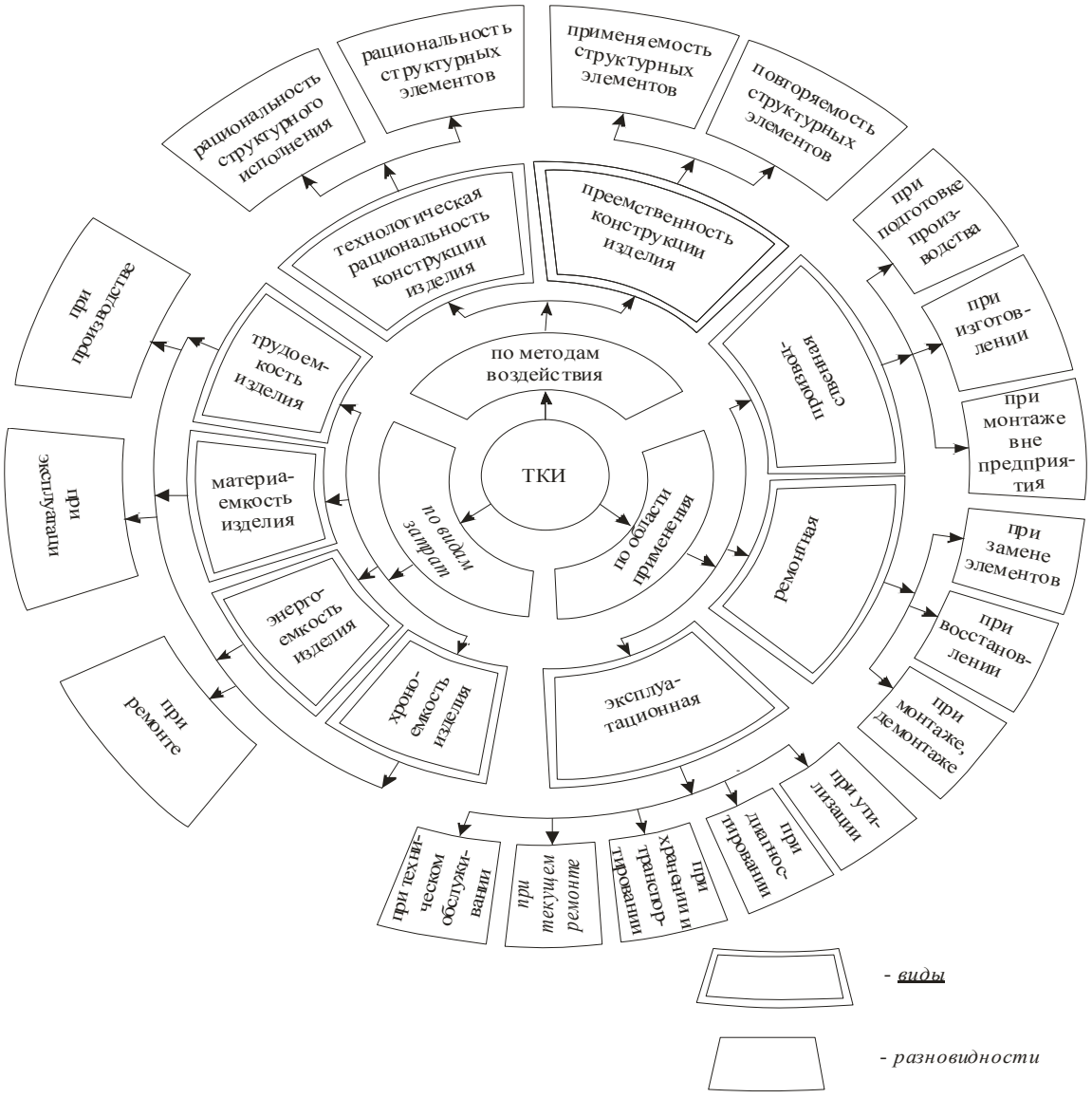


Рис. 14. Классификация ТКИ на виды и разновидности

Виды ТКИ по методу воздействия на конструкцию изделия выражают ее техническую сущность, т.е. те существенные черты конструкции изделия, воздействуя на которые, разработчик разрешает противоречия между активными элементами технологического процесса и изделием.

Технологическая рациональность и преемственность конструкции изделия – две грани одного и того же комплекса свойств, образующих ТКИ. Различие между ними состоит в том, что конструкция изделия рассматривается в разных ракурсах.

Технологическая рациональность конструкции изделия представляет собой совокупность тех свойств изделия, которые выражают технологичность его конструкции с точки зрения соответствия принятых конструктивных решений условиям производства, эксплуатации и ремонта.

Уровень технологической рациональности конструкции изделия регулируется посредством целесообразного (по условиям производства, эксплуатации и ремонта) выбора состава конструктивных элементов и материалов, схем соединения составных частей изделия и т.п.

Технологическая рациональность характеризует возможность изготовления и эксплуатации данного изделия или группы его исполнений при использовании имеющихся в распоряжении производителя и потребителя продукции трудовых, материальных и других видов ресурсов (рис. 15).

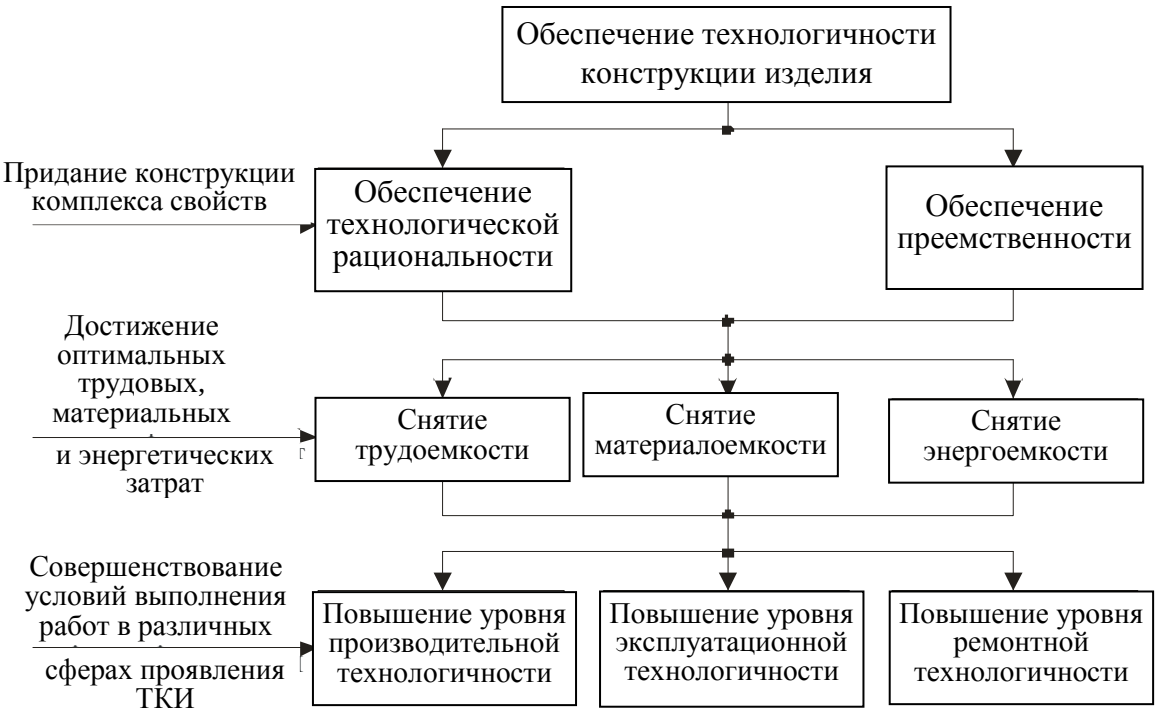


Рис. 15. Схема связей работ по обеспечению ТКИ

Всякое изделие, рассматриваемое как объект производства, эксплуатации и ремонта, должно быть технологически рационально

по своему составу и конструктивному исполнению. Исключение составляют содержащиеся в отдельных изобретениях технические решения, которые на данном этапе развития производства по технико-экономическим соображениям не могут быть воплощены в образцы новой техники при применении имеющихся технических средств и материалов.

Изделие может рассматриваться как технологически рациональное только в конкретных условиях подготовки производства, изготовления, технического обслуживания и ремонта. Следовательно, для обеспечения требуемого уровня технологичности конструкции изделия эти условия должны быть сформулированы к началу его разработки с достаточной степенью точности.

Условия производства и эксплуатации высоко динамичны, поэтому технологическая рациональность конструкции изделия должна рассматриваться и оцениваться применительно к определенной ограниченной зоне изменения этих условий.

Уровень технологической рациональности конструкции изделия непрерывно меняется соответственно изменяющимся условиям и средствам производства, эксплуатаций и ремонта. Эта особенность обусловливает необходимость применения методов количественной оценки технологической рациональности конструкции как по абсолютным значениям соответствующих показателей, так и по отношению значений этих показателей к оптимальным значениям базовых (исходных, плановых) показателей, установленным для данных условий производства, эксплуатации и ремонта и корректируемым по мере изменения этих условий.

Преемственность конструкции изделия представляет собой совокупность тех свойств изделия, которые выражают технологичность его конструкции с точки зрения единства повторяемости и изменяемости принятых в ней инженерных решений. Эти свойства, в частности, характеризуют:

- единство повторяемости составных частей в данном исполнении изделия или рассматриваемом множестве его исполнений и применяемости в них новых составных частей, обусловленных новизной требований к изделию или множеству его исполнений по их функциональному назначению, условиям производства или эксплуатации (конструктивная преемственность изделия);
- единство повторяемости и изменяемости технологических методов выполнения, поддержания и восстановления элементов конструкции изделия, учитываемых при его конструировании (технологическая преемственность конструкции изделия).

Преемственность конструкции изделия становится одним из главных принципов наиболее целесообразной технической подготовки производства. Использование этого принципа позволяет обеспечить преемственность технологических процессов и средств технологического оснащения, наилучшим образом организовать процесс конструкторского и технологического проектирования, максимально использовать все лучшее, что создано ранее в процессах научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических разработок, освоено в производственных условиях и всесторонне проверено в условиях эксплуатации и ремонта.

В этом смысле преемственность конструкции изделия равнозначна ее технологической рациональности, поскольку характеризует многократную применяемость таких решений, которые обеспечены в сферах производства, эксплуатации и ремонта соответствующими материалами и орудиями труда. Тем самым преемственность конструкции, как и ее технологическая рациональность, предопределяет возможность разработки и освоения новой техники.

Виды ТКИ по области ее проявления определяются основными сферами общественного производства, в которых проявляется качество изделия. Они характеризуют приспособленность конструкции изделия к сокращению затрат ресурсов и времени: на техническую подготовку производства, процессы изготовления, сборки и монтажа изделия вне предприятия-изготовителя (производственная ТКИ); на техническое обслуживание, текущий ремонт, хранение и транспортирование, диагностирование и утилизацию изделия (эксплуатационная ТКИ); на все виды ремонта, кроме текущего (ремонтная ТКИ).

Виды ТКИ по производимым затратам выражают ее экономическую сущность, которая проявляется в одной или нескольких конкретных областях. Как виды ТКИ трудоемкость, материалоемкость и энергоемкость изделия представляют собой свойства его конструкции, определяющие соответствующие затраты ресурсов (труда, материалов и энергии) при производстве, эксплуатации и ремонте для заданных показателей качества изделия, объема его выпуска и условий выполнения работ. Одновременно с этим трудоемкость, материалоемкость и энергоемкость выступают как количественные характеристики указанных свойств, являясь показателями ТКИ.

Хроноемкость изделия как вид ТКИ охватывает совокупность свойств конструкции, характеризуемых затратами ресурсов в единицах времени.

Рассмотрим методы и приемы, используемые при отработке конструкции на технологичность (табл. 7).

Таблица 7

Методы и приемы, используемые при отработке конструкции на технологичность

Метод (прием)	Краткая характеристика	Рекомендации по применению
1	2	3
Обеспечение технологической рациональности конструкции изделия		
Параметрическая оптимизация объектов производства	Упорядочение номенклатуры однотипных объектов производства, сходных по функциональному назначению, путем установления рациональных параметрических и типоразмерных рядов изделий	Применение метода позволяет упорядочить номенклатуру объектов производства на исходных этапах становления новых видов техники и заранее исключить возможность появления неоправданного множества этих объектов в будущем
Блочно-модульное построение систем и устройств	Выделение функционально законченной части системы или устройства с образованием блока-модуля, т.е. части изделия, представляющей собой совокупность функционально объединенных элементов	Наиболее эффективен при монтаже вне предприятия-изготовителя и необходимости частой смены модулей как составных частей целого в процессе эксплуатации
Агрегатирование составных частей	Объединение взаимосвязанных составных частей изделия в более крупную составную часть – агрегат для применения как неделимого целого	Метод является основой развития специализации производства составных частей и внедрения высокопроизводительных агрегатных методов ремонта
Оптимизационный метод выбора и назначения конструктивных элементов деталей материалов	Выбор наилучших вариантов конструктивных элементов и материалов из множества возможных с использованием современных математических средств, включая математическое и динамическое программирование, оптимальное управление, векторный анализ. Выбор метода оптимизации зависит от вида целевой функции и характера ограничений	Целесообразные области применения: выбор физико-химических и механических свойств материалов и видов исходных заготовок; установление точности размеров и шероховатости поверхностей; выбор формы и расположения поверхностей деталей и видов соединений их с сопрягаемыми деталями; выбор методов изготовления, в том числе сборки

Продолжение табл. 7

1	2	3
Размерный анализ	Совокупность приемов расчленения объекта на элементарные поверхности и на связи между ними	Применение метода целесообразно при простановке размеров и их предельных отклонений при условии учета оптимальности затрат на изготовление и взаимозаменяемости составных частей конструкции при сборке, монтаже, техническом обслуживании и ремонте
Функционально-стоимостный анализ	Минимизация затрат для обеспечения основных функций изделия	Применим независимо от типа производства. Наибольший эффект дает на ранних стадиях проектирования конструкции изделия
Экономико-математическое моделирование	Описание объектов (процессов) посредством экономических моделей с применением математических средств	Применение целесообразно при установлении взаимосвязи основных функциональных, конструктивных и технологических характеристик изделия, влияющих на затраты труда, материалов и энергии при изготовлении, техническом обслуживании и ремонте, с эффективностью проектируемой техники в народном хозяйстве
Обеспечение конструктивной преемственности изделия		
Типизация конструкции изделия	Создание типового образца изделия для множества его исполнений, обеспечивающего применение при их разработке унифицированных составных частей и связей между ними	Наиболее эффективен при многократной повторяемости конструктивных схем и компоновок изделия и его составных частей

Продолжение табл. 7

1	2	3
Унификация составных частей изделия, конструктивных элементов и материалов	Сокращение разнообразия перечисленных объектов при сохранении (или увеличении) разнообразия сфер (объектов), в которых они применяются	Применяется на всех стадиях создания конструкции изделия и подготовки его производства в том случае, если в сфере производства и эксплуатации повышает производительность труда и качество работы, снижает себестоимость продукции и производимых работ при техническом обслуживании и ремонте
Взаимозаменяемость составных частей	Придание составным частям изделия способности взаимной замены в данном изделии или группе изделий	Наиболее эффективен для составных частей изделия, часто сменяемых в процессе их эксплуатации и ремонта
Заимствование	Выбор составных частей или конструктивных элементов изделия и материалов из числа существующих для применения в разрабатываемой конструкции	Целесообразен при наличии освоенного производства составных частей, конструктивных элементов и материалов
Симплификация	Ограничение или простое сокращение числа типоразмеров выпускаемых изделий и их составных частей однотипного исполнения, номенклатуры конструктивных элементов, сортамента и марок применяемых материалов	Применим в случаях, когда технически и экономически целесообразно уменьшение числа принятых конструктивных решений и материалов
Обеспечение технологической преемственности конструкции изделия		
Типизация технологических процессов производства, эксплуатации и ремонта изделия	Систематизация, анализ и синтез возможных технологических решений с целью разработки технологических процессов, оптимальных для данных условий производства, технического обслуживания и ремонта	Применяется при любом типе производства. Целесообразен при единстве технологической последовательности и общности элементов процесса

Окончание табл. 7

1	2	3
Унификация технологических операций	Сокращение разнообразия операций, обеспечивающее изготовление или ремонт группы изделий различной конфигурации на специализированных рабочих местах в условиях групповой обработки	Применяется в целях резкого повышения загрузки средств технологического оснащения
Стандартизация средств технологического оснащения	Совокупность приемов унификации, агрегатирования и взаимозаменяемости средств технологического оснащения, обеспечивающих многократное использование стандартных компонентов и на этой основе минимизацию затрат на разработку и производство специальных средств оснащения	Наиболее эффективен в единичном и мелкосерийном производствах, а также при создании гибких автоматизированных производственных систем

2.9.3. Взаимосвязь видов технологичности конструкции изделия

Отработка конструкции изделия на технологичность осуществляется непосредственным воздействием на ее техническую сущность путем придания конструкции комплекса свойств, обеспечивающих ее технологическую рациональность и преемственность. Следствием этого воздействия является изменение трудоемкости, материалоемкости, энергоемкости или других возможных видов ресурсоемкости изделия (рис. 16). Эти виды ТКИ в свою очередь проявляются в одной или нескольких конкретных областях, образуя разновидности ТКИ по области проявления. Конструктор, придавая конструкции изделия технологическую рациональность и преемственность в процессе отработки ее на технологичность, должен учитывать одновременно возможные области проявления ТКИ, влияние принимаемых им инженерных решений на снижение ресурсоемкости и повышение уровня ТКИ по каждой области ее проявления с учетом результатов совершенствования условий выполнения работ при производстве, эксплуатации и ремонте изделия.

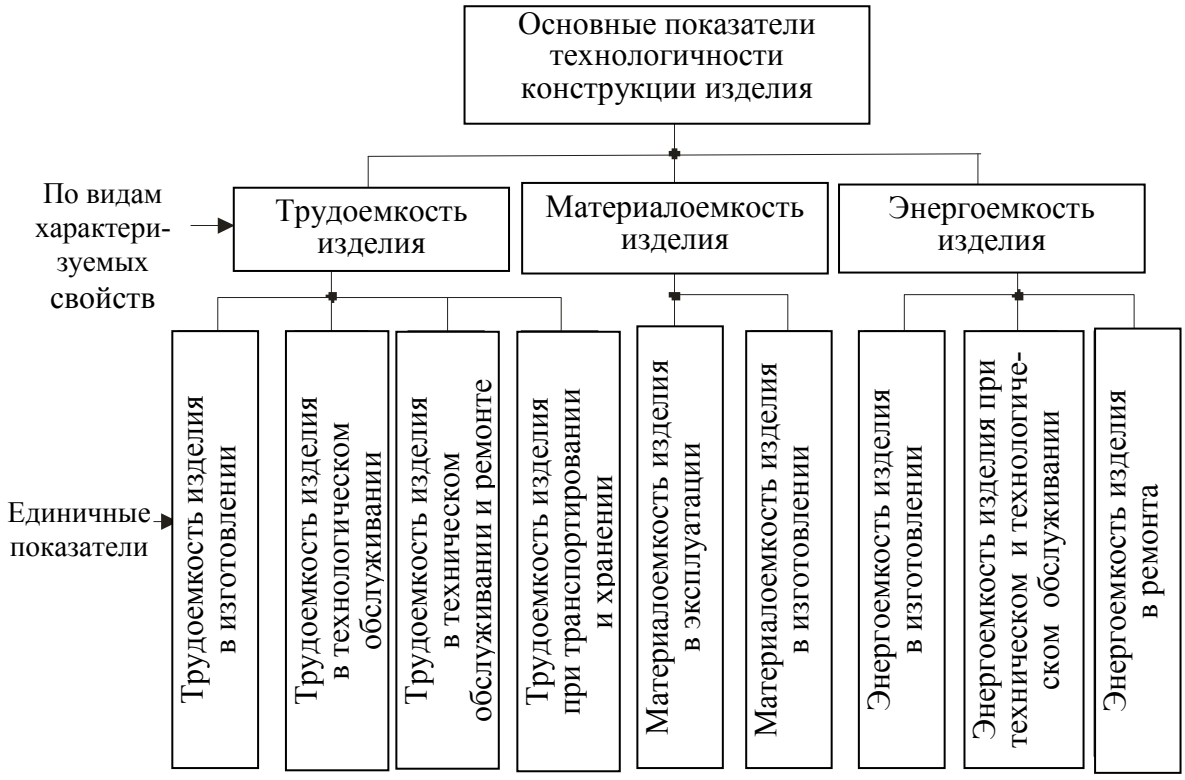


Рис. 16. Основные показатели ТКИ и характеризуемые ими свойства

Показатели ресурсоемкости рабочего процесса характеризуют свойства изделия, определяющие экономичность его функционирования (потребления), т.е. эффективность использования ресурсов (энергии, труда, материалов, времени), необходимых для непосредственного использования изделия по назначению. К таким показателям можно, например, отнести следующие: коэффициент полезного действия установки; удельный расход электроэнергии; удельный расход топлива; время реализации рабочего процесса и т.д.

Основные показатели ТКИ и характеризуемые ими свойства приведены на рис. 16.

Наряду с этими тремя группами единичных показателей к основным показателям относят показатели технологической себестоимости изделия, характеризующие затраты различных видов ресурсов комплексно в стоимостном выражении.

Технологичность имеет качественные и количественные показатели. Качественные показатели используют на ранних этапах конструирования и конструкторско-технологической отработки конструкторской документации (КД), когда количественная оценка технологичности затруднена. Количественная оценка технологичности конструкции включает:

1) базовые (исходные) значения показателей технологичности конструкции, являющиеся предельными нормативами технологичности, обязательными при разработке РЭС;

2) значения показателей технологичности, достигнутые при разработке изделия;

3) показатели уровня технологичности конструкции.

Базовые значения указываются в ТЗ на разработку, а по отдельным видам РЭС (номенклатура устанавливается по отраслям) – в ОСТ.

В качестве основных, рекомендуемых ГОСТ 14.201–83 количественных показателей технологичности РЭС, выступают:

- трудоемкость изготовления РЭС:

$$T_{\text{и}} = \sum T_{i\text{е}} + \sum T_{i\text{д}} n_{i\text{д}} + T_{\text{сб}} + T_{\text{ис}}, \qquad (23)$$

где $T_{i\text{е}}$ – трудоемкость изготовления i-й сборочной единицы; n_{ie} – число i-х сборочных единиц; $T_{i\text{д}}$ – трудоемкость изготовления i-й детали, не вошедшей в состав при подсчете $T_{i\text{е}}$; $n_{i\text{д}}$ – число i-х деталей; $T_{\text{сб}}$ – трудоемкость общей сборки изделия; $T_{\text{ис}}$ – трудоемкость испытания;

- уровень технологичности конструкции РЭС по трудоемкости:

$$K_{\text{ут}} = 1 - T_{\text{и}} / T_{\text{б и}}, \qquad (24)$$

где $T_{\text{и}}$ – расчетная трудоемкость изготовления РЭС; $T_{\text{б и}}$ – базовый показатель трудоемкости изготовления РЭС;

- технологическая себестоимость РЭС:

$$C_{\text{и}} = C_{\text{м}} + C_{\text{з}} + C_{\text{цр}}, \qquad (25)$$

где $C_{\text{м}}$ – стоимость материалов, заготовок, затраченных на изготовления РЭС, руб.; $C_{\text{з}}$ – заработная плата производственных рабочих с начислениями, руб.; $C_{\text{цр}}$ – цеховые расходы, руб.;

- уровень технологичности конструкции РЭС по себестоимости изготовления:

$$K_{\text{ус}} = 1 - C_{\text{и}} / C_{\text{б и}}, \qquad (26)$$

где $C_{\text{и}}$ – рассчитанная технологическая себестоимость изготовления РЭС, руб.; $C_{\text{б и}}$ – базовый показатель трудоемкости изготовления, руб.

На предприятиях радиоэлектронного аппаратостроения для оценки технологичности конструкции изделия действует отрасле-

вая система оценки технологичности изделия (ОСОТП), согласно которой оценка технологичности РЭС определяется по комплексному показателю технологичности и трудоемкости изготовления изделия;

- комплексный показатель K технологичности конструкции РЭС:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{n} k_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^{n} \varphi_i}, \qquad (27)$$

где k_i – расчетный базовый показатель технологичности конструкции (детали, сборочной единицы РЭС); φ_i – коэффициент базовой значимости базового показателя; i – порядковый номер показателя в регенерированной последовательности; n – число базовых показателей, определяемых на данной стадии разработки изделия;

- комплексный показатель $K_{\text{у тр}}$ уровня технологичности конструкции по трудоемкости изготовления РЭС:

$$K_{\text{утр}} = \frac{T_{\text{и}} K_{\text{сл}}}{T_{\text{би}} K_{\text{сн тр}}}, \qquad (28)$$

где $T_{\text{и}}$ – показатель трудоемкости изготовления РЭС; $K_{\text{сл}}$ – коэффициент сложности конструкции РЭС по сравнению с аналогом; $T_{\text{б и}}$ – базовый показатель трудоемкости изделия-аналога; $K_{\text{сн тр}}$ – коэффициент снижения трудоемкости.

Отработка конструкции на технологичность осуществляется на всех этапах разработки изделия, и на каждой стадии принимается одно из решений:

1) утвердить достигнутый уровень;

2) довести до требуемого уровня на данной стадии разработки (доработка);

3) довести до требуемого уровня на следующей стадии;

4) корректировка показателя технологичности.

С целью ускорения получения оценок технологических конструкций, повышения их качества и достоверности указанные работы выполняются с применением ЭВМ путем организации в автоматизированной системе технологической подготовки производства (АСТПП) соответствующих подсистем.

2.9.4. Этапы отработки конструкции на технологичность

Если представить график, на котором по оси ординат отложен весь процесс отработки конструкции на технологичность в процентах по трудоемкости, а по оси абсцисс – этапы проектирования, то получим следующий наглядный пример необходимости отработки конструкции на технологичность в продолжении всего периода. На стадии «техническое задание» по аналогам устанавливаются базовые показатели технологичности и допустимые отклонения от них. На стадии «техническое предложение» определяют оптимальный вариант по технологичности и выявляют оригинальные составные части компоновки изделия, требующие применения новых ТП и оснащения (рис. 17).

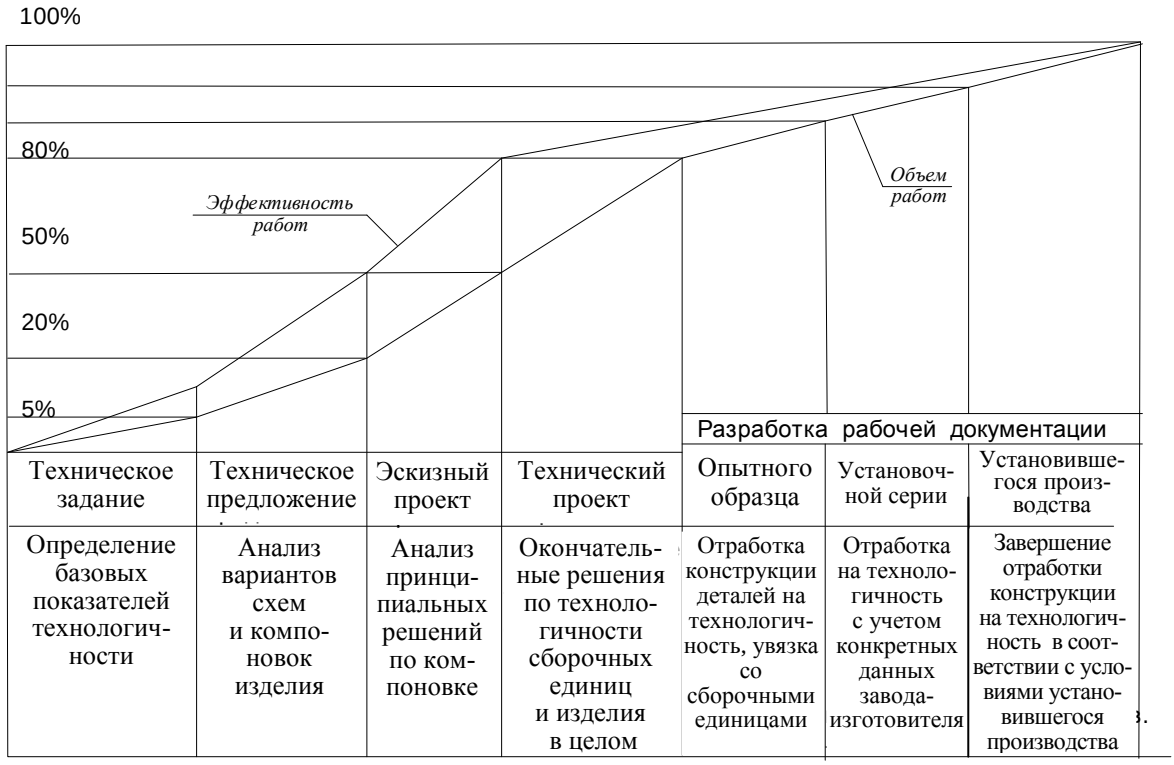


Рис. 17. Этапы отработки изделия на технологичность

Отработка изделий на технологичность (технологический контроль) производится на всех этапах создания конструкторской документации:

- на стадии эскизного проекта производится анализ конкретных конструкторских решений, в том числе анализ целесообразно-

сти применения выбранных материалов, рациональности и технологичности членения конструкции на сборочные единицы, блоки, агрегаты; обеспечения простоты сборки, разборки и т.п.;

- на стадиях технического и рабочего проектов принимаются окончательные решения о технологичности изделия и точности изготовления его элементов;
- на стадии изготовления опытного образца и опытной партии завершается отработка конструкции на технологичность (конкретизируются условия обеспечения технологичности, в том числе возможность использования типовых технологических процессов, унифицированной переналаживаемой оснастки и имеющегося или производимого оборудования).

На этапе разработки документации осуществляется окончательная отработка конструкции на технологичность. Всего в ГОСТ 14.201–73 предусмотрены 22 показателя технологичности в зависимости от вида изделия и стадии разработки конструкторской документации. Номенклатура показателей для однотипных изделий с учетом их конструктивных особенностей устанавливается отраслевыми стандартами. Количество показателей должно быть минимальным, но достаточным для оценки технологичности конструкции изделия.

Отработка конструкции РЭС на технологичность предполагает выполнение следующих взаимосвязанных задач: обеспечение технологичности конструкции РЭС; управление уровнем технологичности РЭС по стадиям разработки конструкторской документации. Обеспечение технологичности конструкции РЭС – функция подготовки производства, предусматривающая решение конструкторских и технологических задач на стадиях проектирования, конструирования, ТПП, изготовления, испытания опытных образцов, передачи изделия в серийное производство и эксплуатацию, направленных на повышение производительности труда, достижения оптимальных трудовых и материальных затрат, сокращения времени на производство, техническое обслуживание и ремонт изделия. Все многообразие работ по обеспечению технологичности конструкции РЭС можно представить тремя основными этапами.

1. Решаются вопросы, относящиеся к изделию в целом: обеспечение высокого качества изделия; выбор принципиальной схемы конструкции, приводящей к рациональному варианту компоновки и простым конструктивным решениям деталей и их сборки; расчле-

нение изделия на части, обеспечивающие удобство монтажа и регулировки; уменьшение количества наименований деталей; технологичность оригинальных деталей; унификация материалов и комплектующих изделий; унификация и стандартизация элементов конструкции; предварительная оценка технического уровня изделия.

2. Решаются вопросы сокращения сроков подготовки производства РЭС и освоения изделия при заданном объеме выпуска; использования современных и наиболее перспективных ТП сборки, регулировки РЭС; достижения заданной точности изготовления деталей и сборочных единиц РЭС в соответствии с техническими требованиями; минимального расхода материала; выбора рациональных средств и методов контроля; максимального использования типовых и групповых ТП, оборудования, оснастки.

3. Рассматриваются вопросы обеспечения надежности РЭС, ее обслуживания, эксплуатации и ремонта, сокращения числа запасных частей и др.

Каждый этап производства РЭС включает шесть стадий разработки:

1) подготовительную, состоящую из анализа технического задания на изделие или пробных процессов и подборки материала для проектирования; 2) эскизное проектирование; 3) техническое проектирование; 4) опытное производство; 5) выполнение установочной серии; 6) серийное или массовое производство.

Одной из важнейших характеристик, влияющих на точность, качество и себестоимость РЭС, является технологичность конструкции. Технологичной называется такая конструкция, которая может быть изготовлена при наименьшей затрате общественного труда и полностью отвечает предъявляемым к изделию эксплуатационным требованиям в конкретных производственных условиях и при заданных масштабах выпуска.

Рассмотрим примерное содержание технологического контроля в зависимости от этапа разработки конструкторской документации (табл. 8).

Технологичность зависит от степени серийности (размера выпуска) и от конкретных производственно-технических условий (в частности, от имеющегося оборудования, энергетических возможностей предприятия, наличия рабочей силы и др.). Конструкция изделия, изготовляемого в условиях мелкосерийного производства, для крупносерийного может оказаться нетехнологичной.

Таблица 8

Содержание технологического контроля в зависимости от этапа разработки конструкторской документации

Стадии разработки	Что проверяется
1	2
Техническое предложение	Правильность выбора варианта конструктивного решения в соответствии с требованиями технологичности
Эскизный проект	Правильность выбора принципиальной схемы конструкции, обеспечивающей простоту компоновки изделия и технологичность. Рациональность конструктивных решений с точки зрения простоты изготовления. Обеспечение преемственности конструкции. Правильность расчленения изделия на составные части, обеспечивающие удобство обслуживания, монтажа и регулировки. Установление номенклатуры основных марок материалов и соответствие этих марок установленному перечню. Возможность применения рациональных методов обработки для наиболее сложных деталей
Технический проект	Возможность проведения сборки и контроля изделия и его основных составных частей независимо и параллельно. Удобство и доступность мест сборки. Возможность исключения или доведения до минимума механической обработки при сборке. Возможность обеспечения необходимой взаимозаменяемости сборочных единиц и деталей. Выбор элементов конструкции сборочных единиц (основных составных частей) с точки зрения их технологичности. Оптимальность номенклатуры контролируемых параметров, а также методов и средств их контроля. Возможность применения стандартизованных методов выполнения и контроля
Рабочая документация	На стадии разработки рабочей документации проверяют данные, указанные для технического проекта, а также: технологичность деталей в зависимости от технологичности сборочных единиц; технологичность сборки как изделия в целом, так и его составных частей (в том числе сварных конструкций); технологичность механически обрабатываемых, литых, горячештампуемых, холодноштампуемых и термически обрабатываемых деталей; возможность разделения сборочной единицы на составные части, сборку которых целесообразно производить параллельно; наличие сборочных баз; удобство сборки и разборки; возможность уменьшения количества и объема пригоночных операций

Качественная оценка характеризует технологичность обобщенно, на основании опыта специалистов-исполнителей (экспертов). Она допустима на всех стадиях проектирования, когда осуществляется выбор лучшего конструктивного решения. Она предшествует количественной оценке и определяет целесообразность количественной оценки и соответствие затрат времени на определение численных значений показателей технологичности сравниваемых вариантов.

Количественная оценка технологичности выражается показателем, численное значение которого характеризует степень удовлетворения требований к технологичности конструкции. Целью количественной оценки является обеспечение эффективной отработки изделия на технологичность при снижении времени и средств на ее разработку, технологическую подготовку производства, изготовление, эксплуатацию и ремонт.

Количественный анализ производится в два этапа:

- количественный анализ ранее разработанных базовых конструкций (изделий-аналогов) с целью установления базовых показателей и уровня технологичности для сопоставления и оценки уровня технологичности вновь разрабатываемых изделий;
- количественный анализ вновь разрабатываемых конструкций по стадиям проектирования с установлением уровня их технологичности.

Различают два вида технологичности: производственную и эксплуатационную (рис. 18). Производственная технологичность проявляется в сокращении времени и средств на конструкторскую и ТПП нового изделия, процессы изготовления изделия, организацию и управление процессом производства. Эксплуатационная технологичность проявляется в сокращении затрат (средств и времени) на подготовку изделия к функционированию, техническое обслуживание и ремонт изделия.

При оценке технологичности могут использоваться как абсолютные, так и относительные показатели. Наиболее распространены и удобны для сравнительной оценки относительные показатели. При определении базовых показателей основываются на статистических данных о ранее созданных конструкциях, типовых для данного класса изделий. Кроме того, учитывается: отличие проектируемого изделия от выполненных ранее по сложности, оригинальности и перспективности конструкции, а также рост производительности труда за счет улучшения технологии производства к периоду изготовления нового изделия.



Рис. 18. Классификация показателей технологичности

Базовые показатели могут быть частными и комплексными, абсолютными и относительными. Состав базовых показателей определяется для однотипных изделий отраслевыми стандартами. Оптимальные значения базовых показателей технологичности указываются в ТЗ на разработку изделия. Для расчета базовых показателей применяются корректирующие коэффициенты:

- коэффициенты сложности $K_{сл}$, определяемые сравнением соответствующих технических требований к старым и новым изделиям;
- коэффициент снижения трудоемкости изготовления изделия $K_т$.

Коэффициент сложности $K_{сл}$ может быть определен как отношение технических параметров проектируемой конструкции к параметрам аналога или прототипа. Коэффициент сложности проектируемой конструкции зависит от технических требований к новому изделию, может быть больше или меньше 1 по сравнению с существующими подобными конструкциями.

Коэффициент снижения трудоемкости $K_т$ зависит от планируемого роста производительности труда и периода времени до начала производства нового изделия:

$$K_т = (100 / (100 + K_{пт}))^t,$$

где $K_{пт}$ – планируемый рост производительности труда;

• период времени от начала проектирования до запуска в производство. Расчет значения базового комплексного показателя $K_б$ может быть произведен по формуле

$$K_б = K_а K_{сл} K_т,$$

где $K_а$ – комплексный показатель изделия-аналога; $K_{сл}$ – коэффициент сложности проектируемого изделия, который определяется головными НИИ по направлениям техники в зависимости от класса изделия и значений основных технических параметров. Необходимость количественной оценки технологичности, а также номенклатура показателей и методика их определения устанавливаются в зависимости от вида изделия, типа производства и стадии разработки конструкторской документации отраслевыми стандартами или стандартами предприятий. При этом число показателей должно быть минимальным, но достаточным для оценки технологичности.

Главными факторами, определяющими требования к технологичности, являются: вид изделия, объем выпуска и тип производства (рис. 19).



Рис. 19. Классификация показателей технологичности

Уровень технологичности – показатель технологичности конструкций, определяемый относительно значения соответствующего базового показателя технологичности.

Показатель технологичности разрабатываемой конструкции – показатель, характеризующий один или несколько ее признаков на стадии разработки конструкторской документации.

Базовый показатель технологичности – показатель, принятый за исходный при сравнительной оценке технологичности конструкций изделий. Для оценки технологичности используются относительные частные показатели K_1 и комплексный показатель K_2, рассчитываемый по средневзвешенной величине относительных частных показателей с учетом коэффициентов, характеризующих весовую значимость частных показателей, т.е. степень их влияния на трудоемкость изготовления изделия. Значения относительных показателей находятся в пределах от 0 до 1, при этом рост значения показателя соответствует более высокой технологичности.

Нормативы показателей технологичности для разрабатываемых (или модернизируемых) изделий устанавливаются путем корректировки показателей изделий-аналогов с учетом изменения технического уровня и условий производства. Решение задачи расчета показателей технологичности проектируемого изделия сводится к определению частных и комплексных показателей технологичности проектируемого изделия и сопоставлению их с базовым. Структурная схема оценки показателей технологичности конструкции приведена на рис. 20.

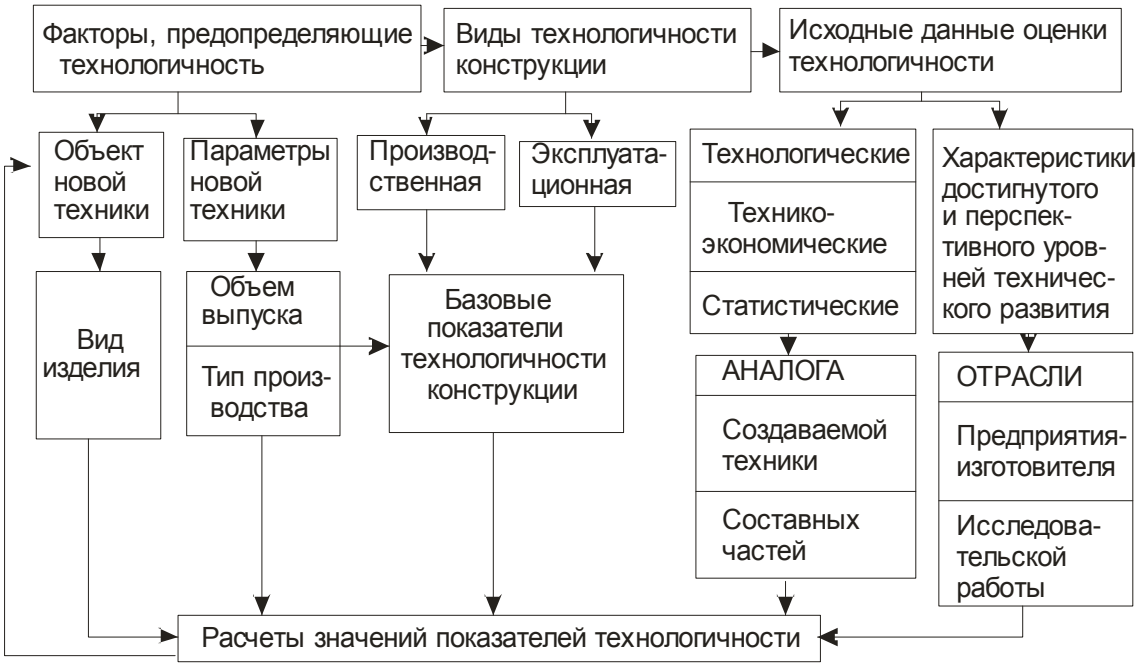


Рис. 20. Оценка показателей технологичности конструкции

2.9.5. Показатели технологичности радиоэлектронных средств, характеризующие конструкцию

Коэффициент унификации конструкции изделия:

$$K_{\text{у}} = \frac{E_{\text{у}} - \text{Д}_{\text{у}}}{E - \text{Д}},$$

где $E_{\text{у}}$ – количество унифицированных сборочных единиц в изделии; $\text{Д}_{\text{у}}$ – количество унифицированных деталей, являющихся составными частями изделия и не вошедших в $E_{\text{у}}$ (стандартные крепежные детали не учитываются); E – количество сборочных единиц в изделии; Д – общее количество деталей в изделии без учета стандартного крепежа.

Коэффициент унификации деталей:

$$K_{\text{уд}} = \frac{\text{Д}_{\text{у}}}{\text{Д}}.$$

Коэффициент стандартизации изделия:

$$K_{\text{ст}} = \frac{E_{\text{ст}} - \text{Д}_{\text{ст}}}{E - \text{Д}},$$

где $E_{\text{ст}}$ – количество стандартных сборочных единиц в изделии; $\text{Д}_{\text{ст}}$ – число стандартных деталей, являющихся составными частями изделия и не входящих в $E_{\text{ст}}$ (стандартные крепежные детали не учитываются).

Коэффициент стандартизации сборочных единиц:

$$K_{\text{сте}} = \frac{E_{\text{ст}}}{E}.$$

Коэффициент стандартизации деталей:

$$K_{\text{стд}} = \frac{\text{Д}_{\text{ст}}}{\text{Д}}.$$

Коэффициент контролепригодности изделия:

$$K_{\text{к}} = \frac{H_{\text{кп}} + H_{\text{тк}} - 1}{H_{\text{кп}} \cdot H_{\text{тк}}},$$

где $H_{\text{кп}}$ – количество контролируемых параметров в изделии; $H_{\text{тк}}$ – количество точек контроля в изделии.

Коэффициент повторяемости марок монтажного провода в изделии:

$$K_{\text{пм}} = \frac{1}{M_{\text{мпр}}},$$

где $M_{\text{мпр}}$ – количество марок монтажного провода в изделии.

Коэффициент повторяемости электрорадиоэлементов (ЭРЭ) в изделии:

$$K_{\text{пэ}} = \frac{1 - H_{\text{тэрэ}}}{H_{\text{эрэ}}},$$

где $H_{\text{тэрэ}}$ – количество типоразмеров ЭРЭ в изделии; $H_{\text{эрэ}}$ – количество ЭРЭ в изделии.

Коэффициент применяемости интегральных схем (ИС в изделии):

$$K_{\text{ис}} = \frac{H_{\text{элис}}}{H_{\text{элис}} + H_{\text{эл}}},$$

где $H_{\text{элис}}$ – сумма элементов, входящих в интегральные схемы изделия (определяются по ТУ на каждую ИС); $H_{\text{эл}}$ – количество радиоэлементов в изделии.

Коэффициент применяемости полупроводниковых приборов в изделии:

$$K_{\text{пп}} = \frac{H_{\text{пп}}}{H_{\text{пп}} + H_{\text{рл}}},$$

где $H_{\text{пп}}$ – количество ПП в изделии; $H_{\text{рл}}$ – количество радиоламп в изделии.

Коэффициент регулируемости схемы изделия на элементной базе:

$$K_{\text{рс}} = \frac{H_{\text{нрэл}}}{H_{\text{нрэл}} + H_{\text{рэл}}},$$

где $H_{\text{нрэл}}$, $H_{\text{рэл}}$ – количество нерегулируемых и регулируемых радиоэлементов.

2.9.6. Показатели технологичности радиоэлектронных средств, характеризующие технологию изготовления изделий

Трудоемкость изготовления изделия:

$$T = \sum^{i} T_i ,$$

где T_i – трудоемкость изготовления, сборки, монтажа, настройки, контроля и испытаний i-й составной части изделия, нормо-час.

Технологическая себестоимость изделия:

$$C_{\text{т}} = C_{\text{м}} C_{\text{з}} C_{\text{ин}} C_{\text{о}},$$

где $C_{\text{м}}$ – расходы на сырье и материалы (без стоимости отходов), руб.; $C_{\text{з}}$ – основная заработная плата производственных рабочих с начислениями, руб.; $C_{\text{ин}}$ – расходы на износ инструмента и приспособлений целевого назначения, руб.; $C_{\text{о}}$ – расходы на содержание и эксплуатацию оборудования, руб.

Коэффициент применения типовых технологических процессов:

$$K_{\text{тп}} = \frac{T_{\text{тп}}}{T},$$

где $T_{\text{тп}}$ – трудоемкость операций, выполняемых по типовым технологическим процессам.

Коэффициент автоматизации и механизации технологических процессов:

$$K_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{ам}}}{T},$$

где $T_{\text{ам}}$ – трудоемкость операций, выполняемых с помощью средств механизации и автоматизации.

Коэффициент автоматизации установки радиоэлементов на печатные платы:

$$K_{\text{ау}} = \frac{H_{\text{ау}}}{H_{\text{ру}}},$$

где $H_{\text{ау}}$ – количество радиоэлементов, устанавливаемых с помощью средств автоматизации; $H_{\text{ру}}$ – количество радиоэлементов, устанавливаемых вручную.

Коэффициент автоматизации и механизации технологических процессов контроля:

$$K_{\text{мак}} = \frac{T_{\text{мак}}}{T_{\text{к}}},$$

где $T_{\text{мак}}$ – трудоемкость операций контроля, выполняемых с помощью средств автоматизации и механизации; $T_{\text{к}}$ – общая трудоемкость контроля изделий.

Коэффициент применения печатного монтажа:

$$K_{\text{прпм}} = \frac{H_{\text{кпг}}}{H_{\text{пс}}},$$

где $H_{\text{кпг}}$ – количество контактных площадок в изделии, пайка которых осуществляется групповым методом; $H_{\text{пс}}$ – общее количество паяных соединений в изделии.

Относительная трудоемкость сборочно-монтажных работ при изготовлении изделия:

$$T_{\text{осми}} = \frac{T_{\text{сми}}}{T_{\text{и}}},$$

где $T_{\text{сми}}$ – трудоемкость операций сборочно-монтажных работ.

Относительная трудоемкость настроечно-регулировочных работ:

$$T_{\text{онри}} = \frac{T_{\text{нри}}}{T_{\text{и}}},$$

где $T_{\text{нри}}$ – трудоемкость настроечно-регулировочных работ.

Коэффициент использования материала:

$$K_{\text{имд}} = \frac{M_{\text{д}}}{M_{\text{зд}}},$$

где $M_{\text{зд}}$ – масса заготовки детали.

2.9.7. Базовые показатели и уровень технологичности конструкции радиоэлектронных средств

На основании отраслевого стандарта все блоки РЭС по номенклатуре используемых показателей технологичности условно разбиты на четыре класса: электронные, электромеханические, ме-

ханические и радиотехнические. В специальную группу блоков выделены соединительные, коммутационные и распределительные устройства. Для каждого класса установлен состав показателей технологичности, которые принимаются как базовые для данного класса. Общее количество показателей, характеризующих технологичность блоков каждого класса, не должно превышать 7.

К перечисленным выше показателям технологичности, из которых выбираются базовые, добавляется еще ряд обобщенных базовых показателей или один из них. К последним относится трудоемкость изготовления блока:

$$T_{\text{бб}} = T_{\text{а}} K_{\text{сл}} K_{\text{т}},$$

где $T_{\text{а}}$ – трудоемкость конструкции-аналога проектируемого блока или трудоемкость, полученная по данным статистики; $K_{\text{сл}}$ – коэффициент сложности блока, определяемый сравнением соответствующих технических требований к старым и новым конструкциям или как отношение технических параметров проектируемой конструкции к параметрам аналога или прототипа; $K_{\text{т}}$ – коэффициент снижения трудоемкости изготовления изделия:

$$K_{\text{т}} = \left(\frac{100}{100 + K_{\text{пт}}} \right)^{t},$$

где $K_{\text{пт}}$ – планируемый рост производительности труда; t – период времени от начала проектирования до запуска в производство.

Удельный базовый показатель трудоемкости изготовления изделия определяется как отношение базового показателя трудоемкости изготовления $T_{\text{б}}$ к номинальному значению основного технического параметра P:

$$T_{\text{уб}} = \frac{T_{\text{б}}}{P}.$$

Уровень технологичности изделия (блока) определяется как отношение значения достигнутого показателя технологичности к базовому.

Числовые значения базовых показателей устанавливаются и утверждаются для каждого конкретного предприятия с учетом специфики выпускаемых изделий и достигнутого организационно-технического уровня производства. Естественно, что ниже уровня ба-

зовых показателей технологичности новая разрабатываемая конструкция РЭС быть не должна.

Основным показателем оценки технологичности конструкции является комплексный показатель технологичности K, который определяется с помощью базовых показателей по формуле

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

где K_i – значение показателя по таблице базовых показателей соответствующего класса блоков; φ_i – весовая значимость i-го показателя; s – общее количество показателей. Независимо от полноты состава определяемых показателей на различных стадиях проектирования φ_i принимается для каждого показателя в соответствии с установленной весовой значимостью.

В целях обеспечения высокого технического уровня изделий для всех предприятий отрасли, разрабатывающих и выпускающих РЭС, устанавливаются нормативы комплексных показателей, которые характеризуют достигнутый предел технологичности, ниже которого показатели вновь разрабатываемого изделия быть не должны.

Расчет нормативного комплекса показателя проводится по формуле

$$K_{\text{н}} = K_{\text{а}} K_{\text{сл}} K_{\text{ту}} K_{\text{оп}} K_{\text{от}} K_{\text{н}},$$

где $K_{\text{а}}$ – комплексный показатель изделия-аналога; $K_{\text{сл}}$ – коэффициент сложности (технического совершенства) нового изделия по сравнению с аналогом; $K_{\text{ту}}$ – коэффициент, учитывающий изменения технического уровня основного производства завода-изготовителя нового изделия по отношению к заводу-изготовителю изделия-аналога; $K_{\text{оп}}$ и $K_{\text{от}}$ – коэффициенты, учитывающие изменения уровня организации производства и труда завода-изготовителя нового изделия по отношению к заводу-изготовителю изделия-аналога; $K_{\text{п}}$ – коэффициент, учитывающий изменения типа производства (отношение коэффициента серийности нового изделия по отношению к изделию-аналогу).

2.9.8. Показатели технологичности конструкций узлов и блоков радиоэлектронных средств

Коэффициент применяемости деталей:

$$K_{\text{пд}} = \frac{1 - Д_{\text{тор}}}{Д_{\text{т}}},$$

где $Д_{\text{тор}}$ – количество типоразмеров оригинальных деталей в блоке; $Д_{\text{т}}$ – общее количество деталей (типоразмеров) в блоке без учета нормализованного крепежа.

Коэффициенты применяемости и повторяемости электрорадиоэлементов:

$$K_{\text{пэ}} = \frac{1 - H_{\text{торэ}}}{H_{\text{тэ}}}; \quad K_{\text{повэ}} = \frac{1 - H_{\text{тэ}}}{H_{\text{э}}},$$

где $H_{\text{торэ}}$ – количество типоразмеров оригинальных ЭРЭ в блоке, $H_{\text{тэ}}$ – общее количество типоразмеров в блоке; $H_{\text{э}}$ – общее количество ЭРЭ в блоке, шт.

К оригинальным деталям относятся те, которые впервые разрабатываются самим предприятием. К электрорадиоэлементам относятся транзисторы, диоды, резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, разъемы, дроссели, трансформаторы, микросхемы, микромодули и т.п. Под типоразмером ЭРЭ понимается габаритный размер (без учета номинальных значений).

Коэффициент использования микросхем и микросборок:

$$K_{\text{имс}} = \frac{H_{\text{мс}}}{H_{\text{мс}} + H_{\text{э}}},$$

где $H_{\text{мс}}$ – общее количество микросхем и микросборок в блоке, шт.

Коэффициент автоматизации и механизации монтажа блока:

$$K_{\text{ам}} = \frac{H_{\text{ам}}}{H_{\text{м}}},$$

где $H_{\text{ам}}$ – количество монтажных соединений, осуществляемых механизированным или автоматизированным способом; $H_{\text{м}}$ – общее количество монтажных соединений.

Коэффициент автоматизации и механизации подготовки ЭРЭ к монтажу:

$$K_{\text{мпэ}} = \frac{H_{\text{мпэ}}}{H_{\text{э}}},$$

где $K_{\text{мпэ}}$ – количество ЭРЭ, подготовка которых к монтажу может быть механизирована или автоматизирована, шт.

Коэффициент автоматизации и механизации операций контроля и настройки электрических параметров:

$$K_{\text{мкн}} = \frac{H_{\text{мкн}}}{H_{\text{кн}}},$$

где $H_{\text{мкн}}$ – количество операций контроля и настройки, осуществляемых автоматизированным или механизированным способом. В число таких операций включаются и те, которые не требуют использования средств механизации; $H_{\text{кн}}$ – общее количество операции контроля и настройки.

Коэффициент прогрессивности формообразования деталей:

$$K_{\Ф} = \frac{\text{Д}_{\text{пр}}}{\text{Д}},$$

где $\text{Д}_{\text{пр}}$ – количество деталей, заготовки которых или сами детали получены прогрессивными методами формообразования (штамповкой, прессованием, порошковой металлургией, литьем по выплавляемым моделям, под давлением и в кокиль, пайкой, сваркой, склеиванием, из профилированного материала), шт.

Все остальные показатели технологичности конструкции блоков определяются аналогично показателям технологичности для изделий, формулы расчета которых приведены выше.

Организационной основой работ по обеспечению технологичности конструкции РЭС и отработки ее на технологичность является назначение одновременно с главным конструктором ОКР заместителя главного конструктора ОКР по технологическим вопросам – главного технолога изделия (ГТИ). В обязанности ГТИ входят: работа по оценке и отработке технологичности конструкции по этапам создания изделия; участие в ТПП РЭС; авторский надзор и сопровождение изделия в экспериментальном, опытном, серийном производстве.

2.9.9. Пути повышения уровня технологичности

Для повышения технологичности необходимо использовать детали одного типа и одной номинальной мощности, дроссели одного габаритного размера, диоды одного типа корпуса, перемычки без изоляции с одним типоразмером. Это обеспечивает повышение коэффициента повторяемости делали и сборочных единиц, а также коэффициента механизации и автоматизации монтажа.

Комплексный базовый показатель технологичности, выраженный в процентах, показывает степень отработки на технологичность.

Необходимо шире использовать типовые ТП, предусматривающие возможность механизации монтажа ЭРЭ. Количество типов, типоразмеров, номинальных значений и установочных размеров выводов ЭРЭ должно быть минимальным.

Должны применяться детали, отвечающие требованиям автоматизированной сборки. Применение микросхем уменьшает размеры несущих конструкций, а также количество деталей. Но здесь возрастают затраты на настройку (за счет разброса параметров ИС). Нужен жесткий входной контроль, а также следует повысить коэффициент применения типовых ТП – за счет группирования по конструктивно-технологическому признаку.

Коэффициент прогрессивности формообразования. К прогрессивным методам относятся литье под давлением, по выплавляемым моделям, холодная штамповка, алмазное точение, электрохимическая и электрофизическая обработки, формообразование из полимерных материалов, порошковая металлургия. Они экономят материал (уменьшают отходы), дают возможность применять высокопроизводительные процессы.

Печатные платы рекомендуется применять ограниченного типоразмера (лучше прямоугольные ПП). Главные пути повышения технологичности – широкий ввод прогрессивных ТП, типовых ТП, автоматизация и механизация монтажа изделий, а также снижение времени на конструкторскую подготовку производства, ТПП и процессы производства, в том числе контроля и испытаний.

Для проведения систематической целенаправленной работы по повышению технологичности конструкции РЭС необходимо уметь оценивать уровень технологичности. Различают качественные и количественные показатели технологичности РЭС. Качест-

венные показатели, как правило, используют на ранних этапах разработки, конструирования и конструкторско-технологической отработки КД, когда количественная оценка технологичности конструирования РЭС затруднена. Количественная оценка технологичности конструкции РЭС осуществляется с помощью системы показателей, которая включает:

1) базовые (исходные) значения показателей технологичности конструкции, являющиеся предельными нормативами технологичности, обязательными для выполнения при разработке РЭС;

2) значения показателей технологичности РЭС, достигнутые при разработке изделия;

3) показатели уровня технологичности конструкции разрабатываемой РЭС.

Базовые значения показателей технологичности указывают в техническом задании на разработку РЭС, а по отдельным видам РЭС, номенклатура которых устанавливается отраслями,– в отраслевых стандартах. Базовые и достигнутые показатели уровня технологичности конструкции РЭС должны вноситься в карту технического уровня и качества изделия. Необходимость количественной оценки технологичности конструкции РЭС, а также номенклатура показателей и методика их оценки устанавливаются в зависимости от вида изделия, типа производства, стадии разработки КД отраслевыми стандартами и стандартами предприятия-изготовителя РЭС.

В комплекс работ по достижению производственной технологичности входят:

- повышение серийности при изготовлении посредством стандартизации, унификации и группирования изделий по конструктивным признакам;
- ограничение номенклатуры конструкций путем повышения заимствования из других изделий и повторяемости деталей и сборочных единиц в одном изделии;
- ограничение номенклатуры используемых материалов;
- снижение массы деталей и изделия в целом;
- выбор освоенных в производстве рациональных конструктивных решений, отвечающих современным требованиям, и дальнейшее их развитие;
- применение прогрессивных, в том числе унифицированных (типовых и групповых) ТП и средств оснащения.

Объем выпуска и тип производства определяют степень стабильности условий на рабочих местах и специализацию цехов и участков, а также форму организации, механизации и автоматизации ТП.

2.10. Устойчивость технологического процесса

Устойчивостью признаков качества технологического процесса на отдельной операции или переходе называется свойство процесса сохранять точность этих признаков во времени. Для автоматически протекающих устойчивых процессов поддержание точности во времени должно быть обусловлено отсутствием регулировок (или автоматическим их выполнением) или изменений условий протекания процесса.

В технологических процессах производства РЭС, характеризуемых стохастическими характеристиками, понятие устойчивости базируется на вероятностных оценках. Начальный момент времени (t_0) возмущенного состояния процесса производства характеризуется распределением плотности вероятности:

$$p\,(x_1, x_2, ..., x_n, t_0) = p_0(x_1, x_2, ..., x_n), \qquad (29)$$

где x_1, ..., x_n – значения параметров стохастического процесса производства.

Невозмущенное состояние обладает полной статистической устойчивостью, если при любом начальном распределении p_0 текущее распределение p стремится к центральному δ-распределению с течением времени:

$$p\,(x_1, ..., x_m, t) - \delta(x_1, ..., x_n,) \text{ при } t \to \infty, \qquad (30)$$

где $\delta\,(0, ..., 0) = \infty$, $\delta(x_1, ..., x_m) = 0$.

Если хотя бы одна из координат отлична от нуля, то справедливо равенство

$$\int_{-\infty}^{\infty} ... \int_{-\infty}^{\infty} p(x_1, ..., x_m, t)dx_1, ..., dx_n = \int_{-\infty}^{\infty} ... \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x_1, ..., x_m)dx_1, ..., dx_n = 1.$$

Если имеет место статистическая устойчивость, то все моменты стремятся к нулю с течением времени при $t \to \infty$:

$$M_{ik...g} = M\left[x_i x_k ... x_g \right] = \int_{-\infty}^{\infty} ... \int_{-\infty}^{\infty} p(x_1, ..., x_m, t) x_i x_k ... x_g dx_1 ... dx_n \rightarrow$$

$$\rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} ... \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x_1, ..., x_m, t) x_1 x_k ... x_g dx_1 ... dx = 0, \qquad (31)$$

где $i, k, ..., g = 1, 2...m$.

Устойчивость является технологической оценкой течения процесса. Вероятностной оценкой будет стабильность процесса. Под стабильностью процесса следует понимать постоянство во времени параметров распределения изучаемого признака качества (размера, физического параметра), что математически подтверждается выражением (31). Стабильный процесс тем самым является устойчивым, если течение его происходит автоматически. Однако устойчивый процесс может быть нестабильным.

В настоящее время наиболее полно изучены устойчивость и стабильность процессов заготовительных и обрабатывающих цехов производства РЭС. Это обусловлено хорошей отработкой в большинстве случаев технологичности конструкции литых, штампованных и других деталей РЭС и сравнительно низкими требованиями точности к большинству из них.

Мало исследованы устойчивость и стабильность новых процессов (например, нанесения пленок) и сборки. Это обусловлено как новизной процессов, так и необходимостью получения при сборке сравнительно неточных деталей заданных выходных параметров узла. Любая статистическая оценка нестабильности процесса относительна и должна корректироваться применительно к конкретному производству РЭС исходя из необходимости внесения тех или иных затрат для повышения качества процесса, т.е. стабильность процесса должна достигаться достаточно дешевыми средствами.

Поскольку анализ устойчивости процесса выполняется обычно статистическими методами, представляется возможным оценивать достаточность автоматизации процесса с точки зрения его устойчивости и определять те меры, которые следует предпринять для повышения устойчивости. При этом могут быть получены также данные для настройки процесса по заданному признаку (например, по точности). Если процесс протекает автоматически при весьма большом количестве изготовляемых деталей (что довольно редко встречается в практике радиозавода, где обычно число изго-

товляемых деталей велико на таких операциях, как холодная штамповка), то можно определить момент предупредительной подналадки процесса (например, смены инструмента на автомате, регулировки положения инструмента и т.д.).

Оценка стабильности и устойчивости процесса изготовления и сборки может быть произведена как на основе изучения распределения в единовременных выборках деталей из совокупности изготовленных, так и на основе изучения изменения статистических характеристик текущих выборок, т.е. измерения размеров периодически отбираемых деталей при их производстве (рис. 21).

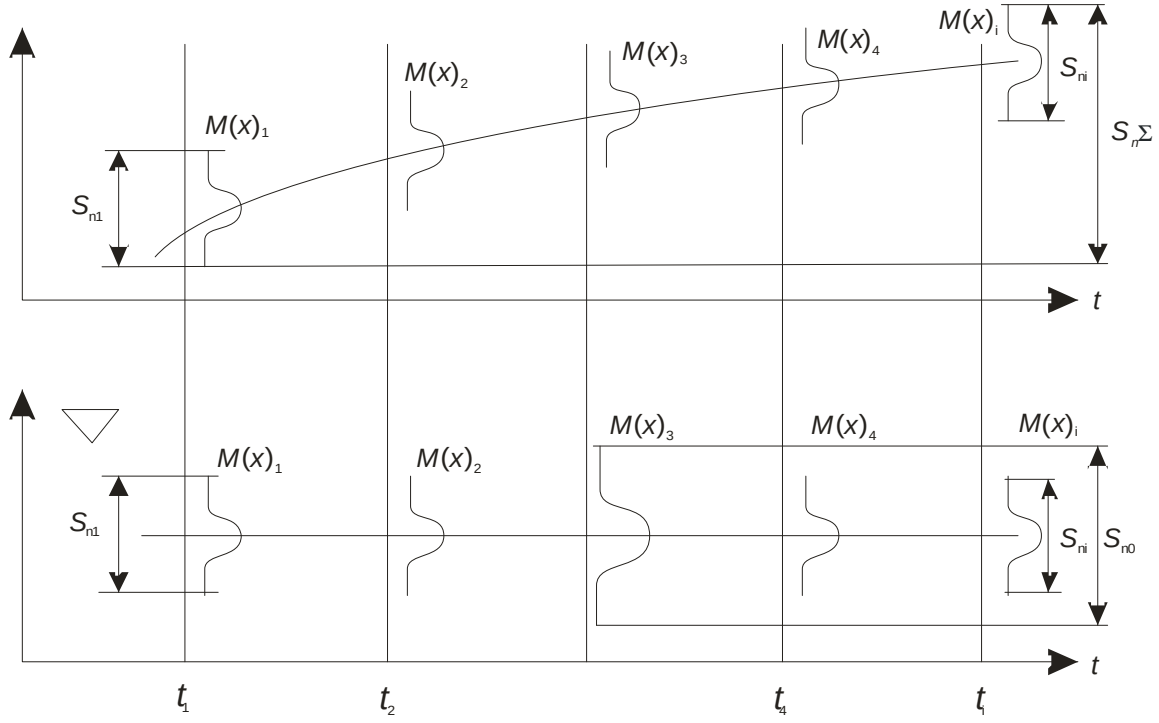


Рис. 21. Точностная диаграмма

При серийном или массовом производстве РЭС необходимо систематически оценивать стабильность и устойчивость технологических процессов. Инженерные методы расчета устойчивости базируются на теории Ляпунова. При сложной структурной схеме технологического процесса целесообразно использовать методы, опирающиеся на критерий Найквиста. Основными из этих методов являются методы фазовой и комплексной плоскостей. Необходимо отметить, что для каждого конкретного технологического процесса следует выбирать такой метод определения устойчивости, который приводит к наиболее простым вычислениям и является более наглядным.

2.11. Структура жизненного цикла радиоэлектронных средств длительного функционирования

Одной из наиболее сложных проблем радиотехники является создание радиоэлектронных средств длительного функционирования (РЭС ДФ). Сложность проблемы состоит в том, что в течение периода функционирования, достигающего нескольких лет (космическая аппаратура), отсутствует возможность проведения профилактических работ и восстановительного ремонта. Кроме того, в период эксплуатации возможно появление таких периодически повторяющихся и эпизодических внешних воздействий, степень влияния которых на элементы РЭС ДФ существенно больше других факторов.

Для создания РЭС ДФ, работающих в столь сложных условиях, необходимо провести комплекс специальных мероприятий на этапах ее разработки и изготовления (рис. 22). В основном эти мероприятия связаны с осуществлением всех возможных мер по повышению надежности РЭС ДФ.

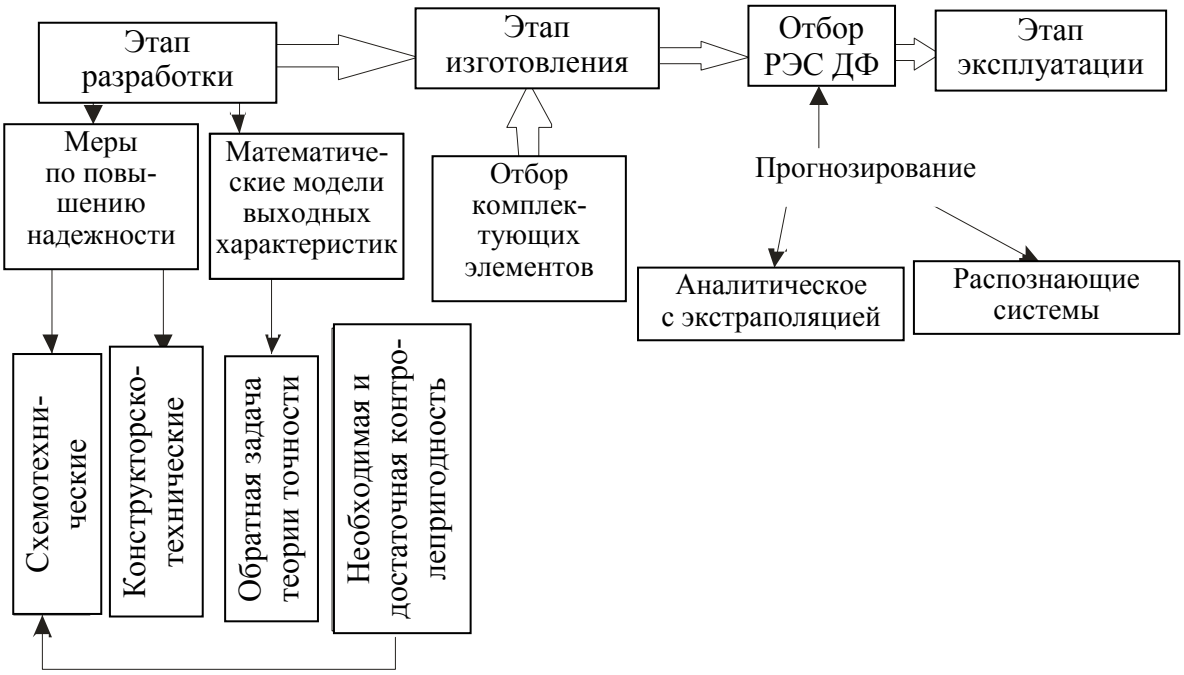


Рис. 22. Структура жизненного цикла РЭС ДФ

Схемотехнические мероприятия по обеспечению надежности РЭС. На этапе разработки для повышения надежности функционирования РЭС проводятся исследования, направленные на совершенствование и упрощение принципиальной схемы.

Конструкторско-технологические мероприятия на этом этапе включают в свой состав разработку отдельных видов защиты РЭС ДФ от влияния внешних факторов, создание запаса электрической, механической, радиационной прочности конструкции, обеспечение технологичности узлов и блоков.

Поскольку в результате проведения таких мероприятий появляются различные варианты решения, то для принятия обоснованного решения о выборе необходимы анализ вариантов и назначение одного или нескольких критериев выбора. По некоторым критериям принятие решения проводится в условиях неопределенности, так как опыт разработки, изготовления и эксплуатации РЭС такого вида подчас слишком мал.

Одним из возможных вариантов создания РЭС ДФ, отвечающих высоким требованиям по надежности, является жесткий отбор после изготовления нескольких экземпляров из их совокупности по некоторым признакам. Однако для того, чтобы произвести обоснованный отбор, необходимо обеспечить построение математической модели выходных характеристик аппарата как функций его элементов, решить обратную задачу теории точности, определить допуски на параметры элементов по известным допускам на выходные характеристики РЭС, обеспечить достаточный уровень контролируемости внутренних физико-химических процессов, происходящих в материалах узлов и блоков радиоэлектронных средств и приводящих его к отказам, и некоторые другие.

На этапе изготовления РЭС ДФ производится:

- отбор высоконадежных комплектующих;
- отбор наиболее надежных экземпляров РЭС ДФ из их некоторой совокупности.

Критерием отбора является максимальный уровень надежности. При оценке возникает проблема выбора математического аппарата прогнозирования. Наиболее совершенными методами прогнозирования надежности элементов и узлов РЭС являются прогнозирование с распознаванием и аналитическое прогнозирование с экстраполяцией. Специфической особенностью РЭС ДФ является то, что при прогнозировании ее надежности обучение ЭВМ с адапта-

цией, которое применяется при распознавании, практически невозможно. Следовательно, аналитическое прогнозирование с экстраполяцией является практически единственным методом оценки.

Необходимый и достаточный уровень контролепригодности на этапе разработки РЭС ДФ представляет собой достаточно сложную самостоятельную задачу. Причем для достижения высоких точностей прогнозирования необходимо проводить предварительное исследование некоторого количества дополнительных характеристик.

Параметрическая идентификация полезна не только на этапе отбора при прогнозировании, но и непосредственно перед этапом эксплуатации. В самом деле, при объявлении предстартовой готовности наиболее эффективной проверкой РЭС ДФ является ее достаточно глубокая диагностика, что без вскрытия РЭС возможно только с помощью параметрический идентификации.

Глава 3

Технология печатных плат

3.1. Классификация печатных плат, области применения

Под печатной платой (ПП) понимают соединение из изоляционного основания и сконструированных металлических слоев, которые служат для электромонтажа элементов и узлов, а также в большинстве случаев и для их механического крепления. Система электрических соединений в виде участков металлического покрытия, используемая вместо объемных проводников, называется печатным монтажом. По функциональному назначению различают сигнальные, потенциальные (заземление, питание), экранирующие и технологические слои проводников, а по расположению – внутренние и внешние.

Применение печатного монтажа (ПМ) обеспечивает замену значительной части ручных монтажных операций машинными операциями, допускающими использование полуавтоматических и автоматических установок и автоматических поточных линий. Открываются широкие возможности замены ручной пайки каждого соединения групповой пайкой всех соединений, располагаемых на одной стороне основания. Сокращаются затраты, связанные с применением конструктивных и соединительных деталей.

Печатный монтаж обеспечивает повышенную механическую прочность отдельных блоков, а также стабильность и идентичность электрических параметров. Применение печатного монтажа повышает надежность и качество радиоэлектронных устройств, упрощает их обслуживание.

Отметим некоторые недостатки печатного монтажа, по сравнению, например, со жгутовым монтажом:

- затруднено внесение изменений в схемы;
- неремонтопригодность печатной платы;
- сложные схемы требуют большой площади, так как преобразование трехмерного объемного расположения в двумерное осуществляется в большинстве случаев с увеличением площади.

Методы изготовления ПП классифицируют по способам создания токопроводящего покрытия и способам нанесения изображения печатных проводников.

Конструктивно-технологические разновидности ПП представлены на рис. 23. В зависимости от числа нанесенных печатных проводящих слоев ПП разделяются на одно-, двусторонние и многослойные. Односторонние ПП (ОПП) выполняются на слоистом прессованном или рельефном литом основании без металлизации или с металлизацией монтажных отверстий. Платы на слоистом диэлектрике просты по конструкции и экономичны в изготовлении. Их применяют для монтажа бытовой аппаратуры, блоков питания и устройств техники связи. Низкие затраты, высокие технологичность и нагревостойкость имеют рельефные (трехмерные) литые ПП, на одной стороне которых расположены элементы печатного монтажа, а на другой – объемные элементы (корпуса соединителей, периферийная арматура для крепления деталей и ЭРЭ теплоотводы и др.). В этих платах за один технологический цикл получается вся конструкция с монтажными отверстиями и специальными углублениями для расположения ЭРЭ, монтируемых на поверхность. В настоящее время технология рельефных ПП интенсивно развивается. Двусторонние ПП (ДПП) имеют проводящий рисунок на обеих сторонах диэлектрического или металлического основания. Электрическая связь слоев печатного монтажа осуществляется с помощью металлизации отверстий. Двусторонние ПП обладают повышенной плотностью монтажа и надежностью соединений. Они используются в измерительной технике, системах управления и автоматического регулирования.

Расположение элементов печатного монтажа на металлическом основании позволяет решить проблему теплоотвода в сильноточной и радиопередающей аппаратуре.

Многослойные ПП (МПП) состоят из чередующихся слоев изоляционного материала и проводящего рисунка, соединенных клеевыми прокладками в монолитную структуру путем прессования. Электрическая связь между проводящими слоями выполняется специальными объемными деталями, печатными элементами или химико-гальванической металлизацией. По сравнению с ОПП и ДПП они характеризуются повышенной надежностью и плотностью монтажа, устойчивостью к механическим и климатическим воздействиям, уменьшением размеров и числа контактов. Однако большая трудоемкость изготовления, высокая точность рисунка и

совмещения отдельных слоев, необходимость тщательного контроля на всех операциях, низкая ремонтопригодность, сложность технологического оборудования и высокая стоимость позволяют применять МПП для тщательно отработанных конструкций электронно-вычислительной, авиационной и космической аппаратуры.

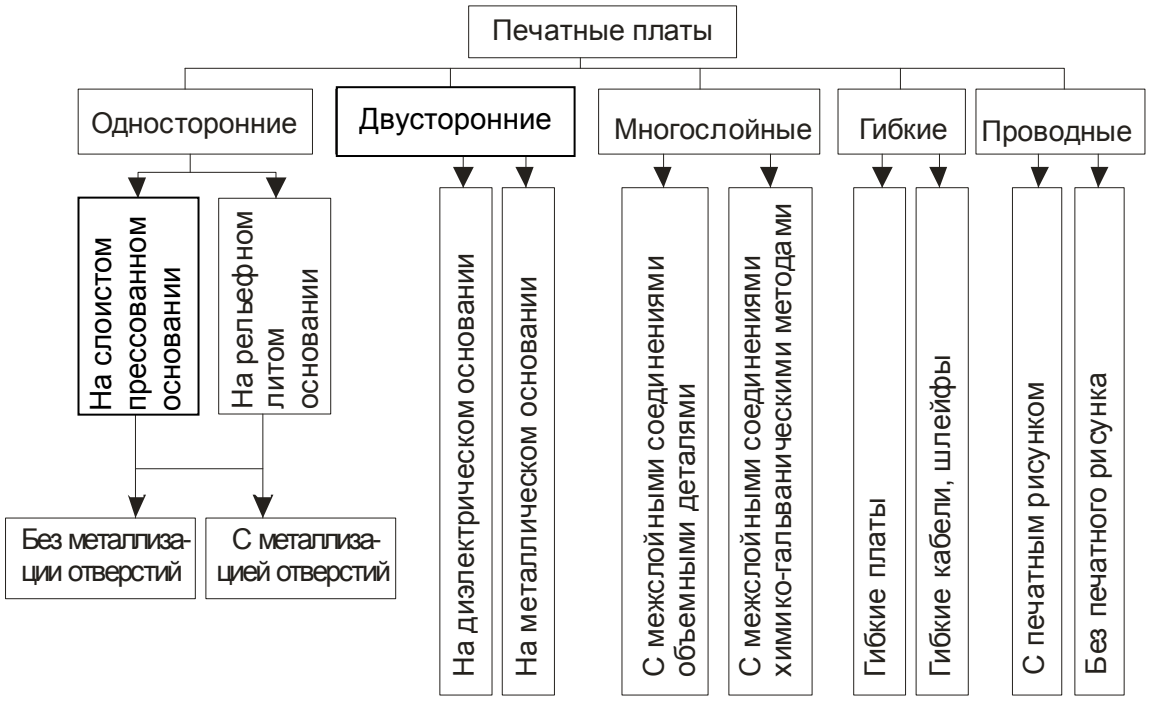


Рис. 23. Классификация печатных плат

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

Проводные печатные платы (проволочно-печатные) представляют собой диэлектрическое основание, на котором выполняется печатный монтаж или его отдельные элементы (контактные пло-

щадки, шины питания и заземления), а необходимые электрические соединения проводят изолированными проводниками диаметром 0,1...0,2 мм. Эти платы нашли применение на этапах макетирования, разработки опытных образцов, в условиях мелкосерийного производства, когда проектирование и изготовление МПП неэффективны. Трехслойная проводная плата эквивалентна по монтажу восьми-, одиннадцатислойной МПП. При этом сокращается количество необходимой технологической оснастки (фотошаблонов) и применяемых операций. В соответствии с ГОСТ 23751–86 для ПП установлено пять классов плотности монтажа:0,75; 0,45; 0,25; 0,15 и пятый – 0,10 мм – ширина проводников и зазоров.

Существуют следующие основные способы создания токопроводящих покрытий:

1. **Электрохимический** – тонкий слой металла (1–2 мкм), нанесенный способом химического осаждения (меднения), наращивают до требуемой толщины в электролитической ванне.

Процесс химического меднения состоит из сенсибилизации, активации и химического осаждения меди.

Первые два этапа предназначены для придания диэлектрику способности к металлизации. Она позволяет изначально создать на поверхности диэлектрического основания пленку (толщиной 1,2 мкм) из ионов двухвалентного олова. При этом происходит адсорбция двухвалентного олова или палладия (отдельными пятнами – равномерно по всей поверхности).

Сенсибилизация – это процесс повышения чувствительности к воздействию каких-либо раздражителей (главным образом химических). Сенсибилизация осуществляется в растворе двухлористого олова с последующей промывкой, а *активация* как процесс нанесения ионов металла – в растворе азотно-кислого серебра или хлористого палладия. При активации происходит осаждение тонкой пленки серебра или палладия на подготовленных (сенсибилизированных) наружных поверхностях платы и отверстиях. Для лучшего смачивания отверстий плате сообщают вибрацию промышленной частоты.

Химическое осаждение меди как стадия химического меднения заключается в восстановлении меди на активированных поверхностях. По сути, происходит реакция замещения ионов серебра (палладия) на ионы меди. Хорошие результаты дает химическое меднение отверстий с наложением ультразвукового поля. Химиче-

ски медненные платы обрабатывают в растворе едкого натрия (10–15 %) при 60–70 °С до полного раздубливания желатина. Последний смывают горячей водой.

Перед гальваническим меднением проводники декапируют в (5–10) %-м растворе соляной кислоты при комнатной температуре в течение 20–30 с. Гальваническое меднение требует замкнутого контура проводящих покрытий, которое осуществляется технологическими проводниками, прошивкой отверстий медной проволокой и применением специальных приспособлений. Медь наращивают в различных электролитах: серно-кислом, борофтористо-водородном и др. При продолжительном воздействии электролита на изоляционное основание возможно ухудшение его диэлектрических свойств.

В условиях крупносерийного производства гальваническое меднение осуществляется на автоматах АГ-82. Платы при этом переносят из ванны в ванну на подвесках.

Медные проводники подвергают серебрению и покрывают канифольным лаком. После сушки скальпелем снимают технологические проводники.

Недостатком электрохимических способов является длительное воздействие химических реагентов на материал платы (около 120 мин в течение цикла изготовления).

2. **Электролитический с переносом** – проводники предварительно осаждаются электролитическим способом на специальную металлическую матрицу с последующим переносом их на изоляционное основание.

3. **Фольгирование** – лист медной электролитической фольги приклеивается к изоляционному основанию с одной или двух сторон.

4. **Вжигание токопроводящих красок** – соединения серебра, содержащиеся в пасте, нанесенной на поверхность изоляционного основания, восстанавливаются при обжиге до металла и соединяются с основанием.

5. **Шоопирование** – расплавленный металл разбрызгивается на изоляционное основание с помощью воздушного пистолета.

6. **Вакуумное распыление** – металлическая пленка наносится на изоляционное основание путем распыления металла в вакууме возгонкой либо под воздействием электрического поля.

7. **Запрессовка металлических порошков** – порошок металла вдавливается в изоляционное основание предварительно нагретым штампом.

Рассмотрим основные способы нанесения изображения печатных проводников.

1. **Фотографический** – копирование контактным способом изображения проводников с фотодиапозитива или негатива на основание, покрытое светочувствительной эмульсией.

2. **Офсетный** – нанесение позитивного или негативного изображения проводников на основание защитной краской с помощью печатной формы.

3. **Сеточнографический** – нанесение позитивного или негативного изображения проводников на основание защитной краской через сетчатый трафарет.

4. **Прессование** – создание с помощью пресс-формы позитивного рельефного изображения проводников на плате в виде канавок.

5. **Штамповка** – вырубка проводников из листа фольги, наложенного на изоляционное основание, специальным штампом.

6. **Тиснение** – нанесение на основание кислотостойких пленок позитивного или негативного изображения проводников с помощью нагретой матрицы и красочной фольги.

7. **Ксерографический** – фотографирование позитивного или негативного изображения проводников методом проекции на пластину с полупроводящим слоем, заряженным до определенного потенциала. Скрытое электростатическое изображение проявляется с помощью заряженных пигментированных порошков, переносится на основание с помощью промежуточной подложки и оплавляется.

8. **Гравирование** – создание с помощью специального инструмента позитивного рельефного изображения в виде канавок.

9. **Рисование** – нанесение изображения проводников на фольгированное изоляционное основание кислотостойкими красками вручную с помощью кисти или плакатного пера.

10. **Нанесение защитной краски через шаблон**.

Сочетание определенного способа создания проводящего покрытия с тем или иным способом нанесения изображения определяет метод изготовления печатных плат.

3.2. Материалы печатных оснований

3.2.1. Требования к материалам печатных оснований

В качестве исходного материала для оснований печатных плат используют листовой одно- или двусторонний фольгированный стеклотекстолит или гетинакс, серийно выпускаемый электротехнической промышленностью.

Фольгирование осуществляется созданием механически прочной связи поверхности медной или алюминиевой фольги с поверхностью листового диэлектрика с помощью склеивания полимеризующих веществ (клеев) под действием нагрева и давления (для бумаги – фенольная смола, для стеклоткани – эпоксидная).

Электрическая характеристика фольгированных оснований зависит от трех факторов: изоляционного основания, фольги и клея, которым фольга приклеена к основанию.

Требования к диэлектрику:

1) минимальная диэлектрическая проницаемость, чтобы не создавать значительных паразитных емкостей между печатными проводниками;

2) малые диэлектрические потери на высокой частоте, т.е. малый тангенс диэлектрических потерь в рабочем диапазоне частот;

3) необходимая диэлектрическая прочность;

4) большое удельное поверхностное и объемное сопротивление изоляции;

5) стабильные диэлектрические параметры в интервале рабочих температур;

6) хорошие механические свойства (сопротивляемость изгибу, ударная вязкость) и обрабатываемость сверлением, штамповкой и фрезерованием.

Изоляционный материал должен выдерживать также кратковременные (10–15 с) воздействия температуры 200 °С и выше, иметь высокую влагостойкость, высокие адсорбционные свойства к клею, которым приклеена фольга, иметь температурный коэффициент линейного расширения, близкий к значениям этого коэффициента фольги. ТКЛР меди в 6–12 раз меньше, чем у гетинакса, и в 63 раза меньше, чем у стеклотекстолита.

Слоистые пластики с бумажным наполнителем, пропитанные фенольной или эпоксидной смолой (гетинакс), применяют тогда, когда основания должны обладать хорошей штампуемостью и средней влагостойкостью.

Слоистые материалы со стекловолокном, пропитанные кремниевой органической смолой (стеклотекстолит), используют при изготовлении оснований, обладающих хорошими диэлектрическими и механическими свойствами, высокой влагостойкостью. Если ПП предназначена для высокой термической нагрузки, то используют силиконовые стеклопластики. Стеклянная ткань в основании способствует сближению температурных коэффициентов линейного расширения пластмассы основания и фольги. Если имеется заметная разница между коэффициентами линейного расширения, то могут произойти коробление платы и обрыв узких проводников (как у гетинакса). Прочность на изгиб у стеклотекстолита в 4–5 раз выше, чем у гетинакса. Ударная прочность в 1,5 выше, чем у гетинакса.

Фольгированный гетинакс на фенольной основе является самым дешевым и наиболее легко штампуемым материалом. Он имеет хорошие электрические характеристики в нормальных условиях, однако обладает плохой химической стойкостью в травильных растворах, низкой теплостойкостью и большим ТКЛР, он гигроскопичен, имеет малую влагостойкость.

Полистирол неприменим при пайке погружением из-за малой теплостойкости, но является хорошим материалом для ПП, работающих на СВЧ. Наиболее перспективным является применение для ПП фторопласта-4 (тефлона), но его применение ограничено сложностью прочной склейки тефлона с металлической фольгой. Гетинакс марки Ав обеспечивает нормальную работу для частот ниже 5 Мгц, а гетинакс марки Вв – до 1 Ггц.

Алюминиевая фольга легче клеится и дешевле, чем медная, но трудности пайки к алюминию заставляют покрывать ее электрохимическим слоем никеля, что влечет за собой дополнительные проблемы.

Плотность тока в ПП не должна превышать 20 А/мм^2 и 15 А/мм^2 – для внутренних слоев.

3.2.2. Конструктивно-технологическая характеристика ПП

По плотности проводящего рисунка печатные платы подразделяются на три класса.

К классу А относятся платы с пониженной плотностью монтажа, имеющие ширину проводников 0,5–0,8 мм и зазоры между проводниками (в узких местах) – 0,5–0,8 мм. Максимально допустимые размеры плат этого класса – 470×479 мм^2.

К классу Б относятся ПП с повышенной плотностью монтажа, т.е. имеющие ширину проводников 0,3–0,4 мм и зазоры (в узких местах) – 0,2–0,4 мм. Максимальные габариты ПП такого класса установлены 120×180 мм^2.

К классу В относятся ПП с шириной проводника 0,2 мм.

Применяемые типоразмеры ПП и шаги координатной сетки регламентированы ГОСТ 10317–79, которым установлены три шага координатной сетки 0,5; 1,25; 2,5 мм. Размеры каждой стороны ПП при длине до 100 мм должны быть кратны 2,5 мм; при длине до 350 мм – 5,0 мм; при длине более 350 мм – 10,0 мм. Максимальный размер любой из сторон не должен быть более 470 мм.

В настоящее время отечественная промышленность выпускает широкий ассортимент фольгированных материалов для печатных плат (ПП) – как жестких, так и гибких. В большинстве своем они не уступают зарубежным аналогам и могут удовлетворить практически любые потребности конструкторов радиоэлектронной аппаратуры.

Однако необходимо отметить, что негорючие материалы для производства ПП составляют всего лишь 10 % рынка материалов, так как отечественные производители не предъявляют должных требований к пожарной безопасности своих изделий. За рубежом на долю негорючих материалов приходится 95 %.

Фольгированный стеклотекстолит марки СФ по-прежнему остается одним из наиболее популярных материалов для печатных плат. Такая востребованность объясняется сочетанием хороших диэлектрических и адгезионных характеристик с низкой ценой. Материал применяется для изготовления одно- и двусторонних печатных плат в относительно несложной радио- и электроаппаратуре.

Выпускаемые промышленностью фольгированные диэлектрики на основе бумаги недорогие, по своим характеристикам пригодны для использования в бытовой и аналогичной аппаратуре.

Рассмотрим конструктивно-технологические особенности печатных плат.

Печатные платы реализуют функции системы взаимозависимых характеристик – монтажных, трассировочных, структурных, конструкционных, электрических, конструктивно-технологических, эксплуатационных, надежностных и экономических.

Конкретные значения характеристик ПП определяются требованиями к устройствам и технологическим уровням изготовления. Мотивацией увеличения сложности коммутации проводников, используемых для производства радиоэлектронных устройств, являются увеличение функциональной сложности и завершенности узлов на коммутационной плате; увеличение сложности и разнообразие форм электронных компонентов, монтируемых на плате.

Наблюдается стремление к минимизации габаритов ПП за счет:

- повышения плотности монтажа компонентов;
- размещения компонентов на обеих сторонах платы;
- уменьшения физической и электрической длины линий связи.

Во многих применениях имеется потребность в повышении быстродействия линий связи. Это достигается прежде всего уменьшением их длины, уменьшением искажения формы передаваемых сигналов и увеличением скорости распространения сигналов. Для этих целей используется материал с малой диэлектрической постоянной, и увеличивается плотность проводников и межслойных переходов. Требуемая плотность связей для корпусированных микросхем оценивается величиной 60–100 см/см^2, а для микросхем в микрокорпусах – величиной 300–500 см/см^2. Для монтажа кристаллов с шариковыми выводами плотность переходов должна быть не менее 310 шт./см^2, для монтажа кристаллов на ленточном носителе (TAB) – 110 шт./см^2, для монтажа керамического корпуса с шагом выводов 0,5 мм – 14 шт./см^2.

Монтаж и коммутацию связями микросхем в корпусах со средним числом выводов и шагом выводов 0,5–0,625 мм могут обеспечивать ПП с 6–8 слоями сигнальных проводников шириной 125–150 мкм, а для монтажа микросхем в микрокорпусах с шагом

выводов 0,25–0,5 мм требуются сверхплотные многослойные печатные платы (МПП), которые могут быть созданы при реализации предельных возможностей техники печатного монтажа с шириной проводников от 50 мкм и микропереходами диаметром 0,1–0,2 мм.

Повышение плотности ПП идет в направлении повышения плотности:

- проводников внутренних сигнальных слоев;
- проводников наружных монтажных слоев;
- рисунка проводников экранных (земли, питания) слоев;
- межслойных переходов в двусторонних сигнальных слоях;
- межслойных переходов к контактным площадкам для присоединения выводов микросхем, самих контактных площадок для присоединения выводов микросхем.

Серийно освоенный уровень технологии изготовления МПП с отношением толщины платы к диаметру сквозных отверстий 5/1 позволяет изготавливать МПП с числом слоев от 4 до 10.

При увеличении функциональной сложности для обеспечения надежности ПП используют следующие принципы:

- изготовление проводников минимально достижимой ширины;
- формирование межслойных переходов предельно малого размера;
- использование простых конструкций соединений и межслойных переходов.

Кроме того, выполняются следующие условия: сигнальные связи размещаются на наружных и близких к поверхности слоях; соединения через торцевые контакты сквозных переходов резервируются, как правило, в цепях подключения к шинам земли и питания. Принятые принципы и условия в полной мере реализуются в ПП с ограниченным числом сигнальных слоев, т.е. в малослойных МПП (4–6 слоев).

Гетинакс и стеклотекстолит фольгированные представляют собой слоистые прессованные пластики, изготовленные на основе бумаги (гетинакс) или ткани из стеклянного волокна (стеклотекстолит), пропитанные термореактивными смолами и облицованные с одной или двух сторон медной электролитической фольгой. Предназначены для изготовления печатных плат. Гетинакс и стеклотекстолит изготовляют следующих марок (табл. 9). Толщина листа и предельные отклонения гетинакса и стеклотекстолита при-

ведены в табл. 9. Условное обозначение фольгированного гетинакса толщиной 2 мм, облицованного с одной стороны медной электролитической фольгой толщиной 35 мкм, – гетинакс ГФ-1-35-2 ГОСТ 10316–78.

Таблица 9

Марка и характеристика гетинакса и стеклотекстолита

Марка	Толщина, мм	Характеристика	Длительно допустимая рабочая температура печатной платы, °С
ГФ-1-35	1–3	Гетинакс, облицованный с одной стороны медной электролитической фольгой толщиной 35 мкм.	До 85
ГФ-2-35	-"-	То же, облицованный с двух сторон.	-"-
ГФ-1-50	-"-	Гетинакс, облицованный с одной стороны медной электролитической фольгой толщиной 50 мкм.	-"-
ГФ-2-50	-"-	То же, облицованный с двух сторон.	-"-
СФ-1-35	-"-	Стеклотекстолит, облицованный с одной стороны медной электролитической фольгой толщиной 35 мкм.	-"-
СФ-2-35	-"-	То же, облицованный с двух сторон.	-"-
СФ-1Н-35	-"-	Стеклотекстолит, нагревостойкий, облицованный с одной стороны медной электролитической фольгой, толщиной 35 мкм.	До 100
СФ-2Н-35	-"-	То же, облицованный с двух сторон.	-"-
СФ-1-50	0,5–3	Стеклотекстолит, облицованный с одной стороны медной электролитической фольгой толщиной 50 мкм	До 85
СФ-2-50	-"-	То же, облицованный с двух сторон.	-"-
СФ-1Н-50	-"-	Стеклотекстолит, нагревостойкий, облицованный с одной стороны медной электролитической фольгой толщиной 50 мкм.	До 100

СФ-2Н-50	-"-	То же, облицованный с двух сторон	-"-

Диэлектрик фольгированный тонкий изготовляют из стеклоткани, пропитанной термореактивной смолой и облицованной с одной или двух сторон электролитической фольгой. Фольгированный диэлектрик предназначен для изготовления МПП и микроэлектронных устройств. Диэлектрик фольгированный в зависимости от свойств изготовляют следующих марок (табл. 10). Условное обозначение диэлектрика фольгированного тонкого марки ФДМ-2 класса А, толщиной 0,25 мм, облицованного с двух сторон фольгой, – диэлектрик фольгированный ФДМ-2А-0,25 ТУ 16-503.084–77.

Таблица 10

Марка и характеристика диэлектрика фольгированного тонкого

Марка	Характеристика
ФДМЭ-1А	Фольгированный диэлектрик, облицованный с одной стороны медной гальваностойкой фольгой с показателями по классу А
ФДМ-2А	Фольгированный диэлектрик, облицованный с двух сторон медной гальваностойкой фольгой
ФДМЭ-1Б ФДМ-1Б	То же, облицованный с одной стороны оксидированной медной фольгой с показателями по классу Б
ФДМЭ-2Б ФДМ-2Б	То же, облицованный с двух сторон оксидированной медной фольгой

Стеклотекстолит фольгированный травящийся представляет собой листовой слоистый прессованный пластик, изготовленный из стеклоткани, пропитанной искусственной термореактивной смолой и облицованной с одной или двух сторон электролитической фольгой с гальваностойким покрытием или медной электролитической оксидированной фольгой. Предназначен для изготовления МПП методом металлизации сквозных отверстий. Фольгированный травящийся стеклотекстолит в зависимости от свойств изготовляют следующих марок (табл. 11).

Таблица 11

Марка и характеристика травящегося фольгированного стеклотекстолита

Марка	Характеристика
1	2
ФТС-1-20-А	Фольгированный травящийся стеклотекстолит, облицованный с одной стороны гальваностойкой медной фольгой,

	толщиной 20 мкм с показателями по классу А
ФТС-2-20-А	То же, облицованный с двух сторон
ФТС-1-20-АО	Фольгированный травящийся стеклотекстолит, облицованный с одной стороны гальваностойкой медной фольгой толщиной 20 мкм с показателями по классу А, с улучшенными показателями по изменению линейных размеров, емкости и толщины
ФТС-2-20-АО	То же, облицованный с двух сторон

Окончание табл. 11

1	2
ФТС-1-35-А	Фольгированный травящийся стеклотекстолит, облицованный с одной стороны гальваностойкой медной фольгой толщиной 35 мкм с показателями по классу А
ФТС-2-35-А	То же, облицованный с двух сторон
ФТС-1-35-АО	Фольгированный травящийся стеклотекстолит, облицованный с одной стороны гальваностойкой медной фольгой толщиной 35 мкм с показателями по классу А, с улучшенными показателями по изменению линейных размеров, емкости и толщины
ФТС-2-35-АО	То же, облицованный с двух сторон
ФТС-1-35-Б	Фольгированный травящийся стеклотекстолит, облицованный с одной стороны оксидированной или гальваностойкой медной фольгой толщиной 35 мкм с показателями по классу А
ФТС-2-35-Б	То же, облицованный с двух сторон

Стеклотекстолит фольгированный травящийся всех марок, кроме марки ФТС-2-35-Б, со сплошным покрытием должен допускать воздействие температуры от –60 до +120 °С, а марки ФТС-2-35-Б – от –60 до +110 °С. Условное обозначение фольгированного травящегося текстолита толщиной 0,18 мм, облицованного с одной стороны гальваностойкой фольгой толщиной 20 мкм, класса А, – стеклотекстолит ФТС-1-20-А-0,18 ТУ 16-503.154–76.

Стеклотекстолит фольгированный нагревостойкий (СФПН) представляет собой слоистый прессованный материал повышенной нагревостойкости, изготовленный из стеклоткани, пропитанной термореактивной смолой и облицованный с одной или двух сторон медной электролитической оксидированной фольгой. Предназначен для изготовления печатных плат. Стеклотекстолит нагревостойкий в зависимости от свойств изготовляют следующих марок (табл. 12).

Таблица 12

Марка и характеристика нагревостойкого фольгированного стеклотекстолита

Марка	Характеристика
СФПН-1-50	Стеклотекстолит, облицованный с одной стороны фольгой толщиной 50 мкм, предназначенный для изготовления печатных плат, допускающих работу при относительной влажности до 98 % и температуре не выше 40°С, а также при температуре до 160 °С в течение суммарного или непрерывного времени 100 ч
СФПН-2-50	То же, облицованный с двух сторон фольгой толщиной 50 мкм

Условное обозначение фольгированного стеклотекстолита нагревостойкого 1,5 мм, облицованного с двух сторон фольгой толщиной 50 мкм, – стеклотекстолит СФПН-2-50-1,5 ТУ 6-05-1776–76.

Стеклотекстолит теплостойкий фольгированный марок СТФ-1 и СТФ-2 представляет собой слоистый прессованный материал, изготовленный из стеклоткани, пропитанной термореактивной эпоксидной смолой, облицованной с одной или двух сторон медной электролитической фольгой. Предназначен для изготовления обычных и многослойных печатных плат методом металлизации сквозных отверстий или другими. В исходном состоянии (со сплошным покрытием фольгой) стеклотекстолит допускает воздействие температур от –60 до +150 °С в течение 150 ч. Стеклотекстолит в зависимости от свойств изготовляют следующих марок (табл. 13). Условное обозначение стеклотекстолита марки СТФ-2 толщиной 0,5 мм – стеклотекстолит СТФ-2-0,5 ТУ 16.503.161–77.

Таблица 13

Марка и характеристика стеклотекстолита марок СТФ-1 и СТФ-2

Марка	Характеристика
СТФ-1	Стеклотекстолит теплостойкий фольгированный для изготовления печатных плат, облицованный с одной стороны медной электролитической фольгой
СТФ-2	То же, облицованный с двух сторон

Диэлектрик фольгированный серии «Д» представляет собой слоистый прессованный материал, изготовленный из стеклоткани, пропитанной эпоксидной смолой и облицованный с одной или двух сторон медной электролитической фольгой. Диэлектрик не расслаивается, и на поверхности не появляются пузыри после выдержки при температуре 130 °С в течение 15 ч. Диэлектрик изготовляют марок ДФС-1 и ДФС-2. Условное обозначение фольгиро-

ванного самозатухающего диэлектрика марки ДФС толщиной 0,5 мм, облицованного с двух сторон медной электролитической фольгой, – диэлектрик ДФС-2-0,5 ТУ 16-503.202–80.

Стеклотекстолит теплостойкий марок СТПА-5-1 и СТПА-5-2 представляет собой слоистый прессованный материал, изготовленный из стеклоткани, пропитанной эпоксидной смолой. Предназначен для изготовления печатных плат как однослойных, так и многослойных с увеличенной плотностью монтажа по полуаддитивной технологии. Стеклотекстолит в зависимости от свойств изготовляют следующих марок (табл. 14). Условное обозначение стеклотекстолита марки СТПА-5-1 толщиной 0,1 мм, облицованного с одной стороны медной электролитической фольгой толщиной 0,005 мм с гальваностойким покрытием, защищенной снаружи медной или алюминиевой фольгой (протектором) толщиной 0,05–0,07 мм, – стеклотекстолит СТПА-5-1-0,1 ТУ 16-503.200–80.

Таблица 14

Марка и характеристика стеклотекстолита СТПА-5-1 и СТПА-5-2

Марка	Характеристика
СТПА-5-1	Стеклотекстолит, теплостойкий, облицованный с одной стороны медной электролитической фольгой толщиной 0,005 мм с гальваностойким покрытием, защищенной снаружи медной или алюминиевой фольгой (протектором) толщиной 0,05–0,07 мм
СТПА-5-2	То же, облицованный с двух сторон

Листы фторопластовые неармированные и армированные фольгированные предназначены для изготовления печатных плат, работающих при температуре от –60 до +250 °С. Фторопластовые листы марок ФФ-4, ФАФ-4Д облицованы с двух сторон медной электролитической хромированной и гальваностойкой фольгой толщиной 0,035 и 0,05 мм. Условное обозначение фольгированных неармированных фторопластовых листов толщиной 2 мм, облицованных медной электролитической хромированной фольгой толщиной 0,035 мм, – лист ФФ-4-0,035Хр-2 ГОСТ 21000–81.

Стеклотекстолит фольгированный марок Ш и ШУ представляет собой слоистый пластик, изготовленный из стеклоткани, пропитанной термореактивной эпоксидной смолой, облицованной с одной или двух сторон медной электролитической фольгой с гальваностойким покрытием.

Предназначен для изготовления микропечатных шлейфов магнитопленочных запоминающих устройств и многослойных полосковых плат быстродействующих ЭВМ. Фольгированный стеклотекстолит в зависимости от свойств изготовляют следующих марок (табл. 15). Условное обозначение фольгированного стеклотекстолита марки Ш, облицованного с одной стороны фольгой, – стеклотекстолит фольгированный Ш-1 ТУ 16-503.169–78.

Таблица 15

Характеристика стеклотекстолита марок Ш и ШУ

Марка	Характеристика
Ш -1	Стеклотекстолит, облицованный с одной стороны медной электролитической фольгой толщиной 20 мкм с односторонним гальваностойким покрытием, предназначенный для изготовления микропечатных шлейфов
Ш-2	То же, облицованный с двух сторон
ШУ-1	Стеклотекстолит, облицованный с одной стороны медной электролитической фольгой толщиной 20 мкм с односторонним гальваностойким покрытием с улучшенными показателями по толщине, приведенной емкости, изменению линейных размеров, предназначенный для изготовления микропечатных шлейфов
ШУ-2	То же, облицованный с двух сторон

Лавсан фольгированный марки ЛФ-1 представляет собой композиционный материал, состоящий из покрытой эпоксидно-каучуковым адгезивом лавсановой (полиэтилентерефталатной) пленки, облицованной с одной стороны медной электролитической фольгой с гальваностойким покрытием. Предназначен для изготовления гибких печатных плат, кабелей, шлейфов.

Условное обозначение фольгированного лавсана толщиной 0,115 мм, облицованного с одной стороны медной электролитической фольгой толщиной 35 мкм, – лавсан фольгированный ЛФ-1-35-0,115 ТУ 6-503.196–80.

3.3. Фоторезисты

Фоторезистами называют светочувствительные составы, применяемые при производстве ПП всех видов, для получения рисунка ПП. Фоторезисты устойчивы к действию агрессивных химических факторов, и поэтому их применение не связано со специальными защитными мерами. Подразделяют фоторезисты на сухие, пленочные и жидкие. Жидкие фоторезисты подразделяют на негативные и позитивные.

Негативные фоторезисты под действием излучения, вызывающего активацию фоторезиста, образуют защитные непрозрачные участки поверхности, соответствующие по рельефу печатному монтажу. Под действием излучения такой фоторезист фотополимеризируется, и освещенные участки после проявления остаются на поверхности основания.

Позитивные фоторезисты под действием облучения образуют участки, которые будучи экспонированными на поверхности ПП, разрушаются после обработки их соответствующими растворами.

По своей природе фоторезисты делят на следующие:

1) фоторезисты, чувствительность к излучению которых обусловлена введением в них специальных добавок;

2) фоторезисты, которые сами по себе чувствительны к активному излучение.

К первому типу относятся фоторезисты на основе поливинилового спирта. Спирт хорошо растворяется в воде, при добавлении к его водному раствору бихромата аммония фоторезист приобретает чувствительность к излучению.

Разрешающая способность этого фоторезиста 50 линий/мм. Стоимость невысока. Проявляется обычной водой, что обеспечивает ему преимущественное распространение данных в технике печатного монтажа.

Недостатком этих фоторезистов является эффект темнового дубления, проявляющийся в задублении сухого слоя фоторезиста не только под действием света, но и в темноте. Чем ниже температура и влажность, тем медленнее темновое дубление. Срок хранения ПП с нанесенным фоторезистом не более суток. Основной недостаток фоторезиста на основе поливинилового спирта – его низкая гальваностойкость.

Влажность воздуха определяет степень набухания фоторезиста, которое ухудшает адгезию последнего с медной фольгой, ухудшает прочность слоя. Для устранения данного явления прояв-

ленный рисунок печатного монтажа подвергают химическому и термическому дублированию.

Фоторезисты второго вида состоят из различных диазосоединений. По способу образования рисунка они являются позитивными фоторезистами. Под действием света диазосоединения разлагаются и образуют инденкарбоновые кислоты, которые легко растворяются в растворах слабых щелочей. Основой процесса проявления фоторезиста является реакция нейтрализации – образование соли, которая легко растворяется в воде.

Технические преимущества очень велики – разрешающая способность – 350–400 линий/мм, может быть доведена до 1000 линий/мм. Производство печатных проводников шириной 0,1–0,2 мм обеспечивает преобладающее применение таких фоторезистов в технике печатного монтажа ответственной аппаратуры.

Еще одно его достоинство – это отсутствие эффекта темнового дубления.

Рассмотрим вопрос нанесения фоторезистов на заготовки печатных плат.

Жидкие фоторезисты наносят на ПП методом окунания с последующим медленным вытягиванием заготовки из раствора или валковым методом. Именно равномерность толщины фоторезиста предопределяет качество изготовления ПП.

В качестве источника света применяются коротковолновые излучатели с большой долей ультрафиолетового излучения (так называемое «жесткое излучение»).

Все большее распространение находят сухие фоторезисты, которые по разрешающей способности почти не уступают фоторезистам на основе диазосоединения, а по технологичности на много их превосходят.

Сухой фоторезист представляет собой тонкую пленку, полимеризирующуюся под действием ультрафиолетового излучения. Конструктивно фоторезисты состоят из трех слоев:

1) оптически прозрачная пленка полиэтилентерефталата (полиэфир);

2) пленка светочувствительного полимера;

3) защитная полиэтиленовая пленка.

В зависимости от толщины слоя фотополимера фоторезист используют для защиты при травлении, селективной металлизации,

селективного наращивания слоев металлов путем гальванической металлизации, а также защиты отверстий при химической очистке.

Порядок применения сухого пленочного фоторезиста:

1) на предварительно очищенное основание ПП с помощью специальной валковой установки приклеивается слой фотополимера, защищенный оптически прозрачной пленкой полиэтиленфтолата, а защитная полиэтиленовая пленка автоматически удаляется, при этом процесс сопровождается подогревом для улучшения адгезии;

2) осуществляется экспонирование рисунка.

Защитная полиэтиленфтолатная пленка удаляется только перед травлением.

Выпускают фоторезисты СПФ-1 и СПФ-2 (для 1 – ширина проводников 100–200 мкм, 2 – 150–250 мкм и расстояние между ними 150 мкм).

СПФ-2 характеризуется высокой светочувствительностью, достаточной разрешающей способностью, хорошим качеством полива и высокой адгезией к материалу подложки, устойчивостью к химическим воздействиям, простотой приготовления, безопасностью в работе.

Операции нанесения, экспонирования, проявления СПФ должны производиться в обеспыленном помещении с актиничным (желтый цвет) освещением при температуре 18–25 °С и относительной влажностью 50–5 %. Перед нанесением СПФ поверхность заготовок должна быть тщательно очищена от механических и жировых загрязнений.

СПФ на заготовки наносят с помощью установок нанесения – валковых ламинаторов, валики которых нагреваются до 100–125 °С. Для получения хорошей адгезии фоторезиста к заготовкам необходимо строго соблюдать температурный режим. Скорость нанесения фоторезиста в зависимости от толщины светочувствительного слоя колеблется от 0,3 до 1,0 м/мин. Для слоев с внутренними переходами рекомендуется использовать СПФ толщиной 60 мкм или 40 мкм, наносимый в два слоя (во избежание «проваливания» фоторезиста в отверстия или разрыва его струей растворителя). Межоперационное время хранения заготовок с нанесенным СПФ составляет не менее 30 мин.

Одной из важных операций является экспонирование. Максимум чувствительности СПФ находится в диапазоне 355–365 нм (предел светочувствительности 320–400 нм). Такой диапазон обес-

печивают ртутные лампы мощностью 2,5 кВт. При экспонировании разница освещенностей не должна превышать 5 %. Усилие прижима фотошаблона к заготовке в раме экспонирования – более 0,8 кгс/см^2.

На фотошаблоне не допускаются складки, трещины, пятна, царапины, разбитые базовые отверстия. Межоперационное время хранения экспонированных слоев составляет не менее 30 мин в темноте для обеспечения полноты протекания «темновой» реакции фотополимеризации.

Проводящий рисунок проявляется в струйных машинах метилхлороформом (давление растворителя и промывочной воды – 1,2–1,7 кгс/см^2).

Сушка осуществляется сжатым воздухом. Время проявления зависит от толщины слоя фоторезиста (40–80 °С), температуры растворителя – 16–21 °С.

Край рисунка после проявления должен иметь тот же цвет, что и весь защитный рельеф (иногда появляется «вуаль» нерастворенного фоторезиста при загрязнении метилхлороформа). Кроме точности воспроизведения размеров, цвет рельефа является одним из критериев правильно подобранной экспозиции. Оптимальное время экспонирования определяется известным методом при любом новом изменении условий экспонирования.

Межоперационный срок хранения слоев до операции снятия фоторезиста не должен превышать трех суток, так как при долгом хранении экспонированного и проявленного рисунка на поверхности фольги остается несмываемый слой остатков фоторезиста, который приводит к браку на операции оксидирования слоев и вызывает расслоение плат. Фоторезист удаляют хлористым метиленом на установках струйного типа, время – 30–60 с.

Цветочувствительность СПФ следует повышать, так как увеличение времени экспонирования ведет к возрастанию погрешности воспроизведения линейных размеров фотошаблона. Кроме того, увеличивается хрупкость СПФ, неудовлетворительно снимается полиэтилентерефтолатная защитная пленка, возрастает температура в зоне экспонирования (свыше 40 °С), вызывающая помутнение плестигласа, помутнение пленки вакуумной рамы и температурные деформации фотошаблонов.

3.4. Диазокопирование

Большинство производств не имеет собственного фотооборудования для плат размером более 60×90 мм, поэтому приходится обращаться к фотолабораториям.

Более дешевое оборудование можно получить, если заменить фотооборудование для контактной печати на использование полиэфирной пленки с диазослоем, т.е. пленки для контактной печати, чувствительной к сине-фиолетовым (ультрафиолетовым) частям спектра. Диазопленка имеет хорошие параметры геометрической стабильности по отношению к изменениям относительной влажности и температуры, причем они несколько лучше, чем те же параметры у контактных фотопленок. Диазопленка нечувствительна к рассеянному дневному свету, поэтому отпадает необходимость в темной комнате. Проявление ведется в парах аммиака, следовательно, процесс можно вести в камере для проявления в обычном станке для диазопечати. Так как в процессе проявления не применяется вода, не происходит изменений пленки по длине, и отпечатки готовы для немедленного использования после проявления. При обработке диазопленки не может быть перепроявления, что обусловливает широкий диапазон режимов процесса копирования. Светочувствительный диазослой обеспечивает изображение без зерна с высокой контрастностью и высокой разрешающей способностью, теоретически более 500 линий/мм. Качество копий при последовательном копировании настолько высокое, что между копиями первого и четвертого порядков не обнаруживается никакой разницы.

Для повышения четкости контуров необходим хороший контакт между оригиналом и диазопленкой, с этой целью при печати используют вакуумный присос.

На этапе эскизной компоновки РЭС, в процессе которой определяются основные габариты, типоразмеры плат и необходимая для данного изделия плотность проводящего рисунка, выбирают метод изготовления плат. При выборе метода учитывают электрические параметры схемы, элементную базу, климатические условия, механические требования, предъявляемые к конструкции, обеспечение необходимой надежности в различных условиях эксплуатации.

Экономическая целесообразность применения каждого метода при различных типах производства определяется на основании анализа характеристик способов получения токопроводящих покрытий

и способов получения изображения печатного проводника, трудоемкостью и длительностью технологического цикла метода, быстротой налаживания производства.

Точность и разрешающая способность каждого метода в основном определяются способом создания изображения токопроводящего покрытия. Точность зависит от сочетания способа нанесения изображения и способа получения токопроводящего покрытия.

Надежность электрических соединений и ремонтопригодность печатных узлов в основном зависят от дефектов, возникающих при действии на аппаратуру климатических воздействий, вибрационных и ударных нагрузок. Таковыми являются отслоение печатных проводников от платы и последующий их разрыв; выход из строя паяного соединения, т.е. нарушение электрического контакта между выводом элемента и печатным проводником. Эти дефекты обусловлены сравнительно небольшой прочностью сцепления проводников с основанием и отсутствием металлизации в отверстиях некоторых печатных плат. Особенно ненадежным является участок контактной площадки, где осуществляется электрическое соединение вывода навесного элемента и печатного проводника.

О ремонтопригодности узлов можно судить по допустимым количествам перепаек выводов радиоэлементов, установленных на печатных платах.

Металлизированные отверстия допускают 5–6-кратное перепаивание деталей с индивидуальной выпайкой выводов, установленных без подгибки их концов.

Узлы на платах, не имеющих металлизированных отверстий, оказываются непригодными к ремонту, так как при перепайках наблюдается отслоение контактных площадок от основания платы в результате разрушения клеевого слоя при перегреве.

3.5. Методы изготовления одно- и двусторонних печатных плат

Традиционно для изготовления одно- и двусторонних печатных плат (ПП) используют два вида технологии получения проводящего рисунка слоев ПП:

- на основе субтрактивных методов – негативного и позитивного;
- на основе аддитивного формирования – метод ПАФОС.

По субтрактивной технологии рисунок ПП получают травлением медной фольги по защитному изображению в фоторезисте, нанесенном на поверхность фольгированного диэлектрика (негативный метод) или в металлорезисте, осажденном на поверхность гальванически сформированных проводников в рельефе фоторезиста, нанесенного на фольгированный диэлектрик (позитивный метод). При создании новых изделий РЭС рекомендуются следующие способы изготовления ПП:

- **химический**, основанный на травлении медной фольги с пробельных мест заготовки фольгированного диэлектрика;
- **электрохимический**, состоящий из процессов химической металлизации будущих проводников и контактных площадок (химическое меднение) и последующего увеличения их толщины гальваническим осаждением меди (электролитическое наращивание);
- **комбинированный**, представляющий собой комбинацию первых двух методов, причем дорожки изготавливаются химической технологией, а металлизация стенок отверстий – электрохимической. Комбинированный метод подразделяется на негативный и позитивный.

Химический и комбинированный методы являются субтрактивными процессами (subtratio – отнимание – лат.), в которых рисунок получают избирательным удалением участков фольги с диэлектрического основания ПП. В аддитивных процессах (электрохимический) (additio – прибавление – лат.) проводящий рисунок получают избирательным осаждением проводящего металла на нефольгированный материал основания с введенным катализатором и адгезивным слоем.

Процесс изготовления ПП химическим методом является наиболее простым и позволяет изготовлять ПП с повышенной плотностью монтажа, но при этом не обеспечивает высокой прочности сцепления в местах установки выводов элементов из-за отсутствия металлизации в отверстиях. Прочность сцепления обеспечивается размерами контактных площадок и качеством фольгированного диэлектрика. Метод применяется при изготовлении ПП для аппаратуры общего применения. Наиболее целесообразно применять при серийном производстве метод получения рисунка схемы методом

сеткографии.

Отметим некоторые недостатки химического метода:

- для фольгирования диэлектриков необходима высококачественная электролитическая медная фольга;
- высоки потери меди, так как приблизительно 60–70 % (а порой и все 90) медной фольги удаляется в процессе травления;
- важна проблема сточных вод, так как регенерация меди и соответственно нейтрализация травильной ванны, в общем, экономичны только для больших предприятий с высокой производительностью;
- для ПП с металлизированными отверстиями необходимы дополнительные химические или гальванические процессы, а также особые защитные покрытия, стойкие к травлению (например, плакирование сплавом олово-свинец или золотом);
- ограничение минимальной ширины проводников и зазоров между ними из-за подтравливания медной фольги под рисунком.

Отметим, что для уменьшения подтравливания применяют тонкую (9 мкм) и сверхтонкую (5 мкм) фольгу.

В качестве преимуществ электрохимического метода отметим следующее:

- более высокая надежность, так как проводники и металлизация отверстий получаются в едином гальваническом процессе;
- однородность соединений между проводниками и металлизацией отверстий;
- отсутствие гальванического защитного покрытия при травлении;
- экономия меди, химикатов.

Основной недостаток химико-гальванического аддитивного метода состоит в том, что получаются неравномерная толщина покрытия из-за неравномерного распределения плотности тока гальванических ванн и возникновение переходной зоны между химически восстановительной гальванически осажденной медью.

Следует также отметить следующий недостаток: при химическом и гальваническом способах осаждения меди происходит увеличение размеров токопроводящих участков за счет разращивания меди на рисунке печатных проводников. Если пробельные места защищены краской (толщина 5–7 мкм), то разращивание велико и

примерно соизмеримо с толщиной осаждаемого слоя меди. Если пробельные места защищены сухим пленочным фоторезистом (толщина 40–60 мкм), то разращивание осажденной меди минимально.

При комбинированном негативном методе изготовления ПП на фольгированном диэлектрике с металлизацией отверстий вначале производится травление медной фольги с пробельных мест, а затем выполняются операции сверления отверстий и их металлизация.

При нанесении рисунка схемы проводники и контактные площадки покрываются защитным слоем, затем стравливается фольга с пробельных мест. После сверления и химического меднения отверстий производится гальваническое осаждение меди на проводники, контактные площадки и в отверстия. Электрическое соединение всех элементов схемы осуществляется с помощью контактирующего устройства или технологических проводников. После завершения процесса изготовления для улучшения паяемости после хранения платы покрываются легкоплавким припоем – сплавом Розе.

Метод позволяет изготавливать ПП с меньшей плотностью монтажа. Может быть рекомендован для изготовления ПП ответственной аппаратуры при тщательной отработке процесса и статистическом контроле электрических параметров печатных схем.

При комбинированном позитивном методе ПП изготавливают на фольгированном диэлектрике с металлизацией отверстий. Сначала выполняются операции сверления отверстий и их металлизация, а затем – травление меди с пробельных мест.

При нанесении рисунка схемы защитным слоем покрываются пробельные места, а на оставшиеся открытыми проводники, контактные площадки и отверстия в дальнейшем осаждаются гальваническая медь и защитный слой металла, предохраняющий медь от травления. В зависимости от применяемого фоторезиста сверление отверстий ведется до нанесения рисунка схемы или после. При использовании сухих пленочных фоторезистов сверление отверстий и химическое меднение выполняются до нанесения рисунка. При использовании жидких фоторезистов, наносимых методом погружения, сверление отверстий и химическое меднение выполняются после нанесения рисунка и покрытия его лаком. Операция травления выполняется после химической и гальванической металлизации.

Отметим достоинства комбинированного позитивного метода:

• исключается возможность срыва контактных площадок при сверлении;

• сплошной слой фольги защищает поверхность диэлектрика от воздействия агрессивных растворов и обеспечивает электрический контакт всех элементов схемы;

• ограничено вредное воздействие химических растворов на адгезию фольги и изоляционное основание.

Метод позволяет изготавливать ПП с повышенной плотностью монтажа, высокими электрическими параметрами и высокой прочностью сцепления проводников. Он рекомендуется при изготовлении ПП для аппаратуры, работающей в жестких условиях эксплуатации. Метод является предпочтительным в новых разработках.

Наиболее трудоемкими являются комбинированный позитивный и электрохимический методы.

В табл. 16 проведена сравнительная характеристика описанных выше методов изготовления ПП.

Таблица 16

Сравнительная характеристика методов изготовления ПП

Методы	Точность, мм	Минимальные размеры, мм	
		ширина проводника	ширина промежутка
Фотохимический	± 0,15	0,6	0,2
Сеточно-химический	± 0,2	1,1	1,2
Офсетно-химический	± 0,2	1,0	1,0
Фотоэлектрохимический	± 0,15	0,8	0,8
Сеточно-электрохимический	± 0,3	1,2	1,3
Офсетно-электрохимический	± 0,2	1,1	1,0

Представляет интерес рассмотреть сравнительную таблицу тока мгновенного сгорания для проводников одного поперечного сечения, но изготовленных по различным технологиям (табл. 17).

Таблица 17

Сравнительная характеристика проводников по току мгновенного сгорания

Вид проводника	Сечение, $мм^2$	Сопротивление, Ом· м	Ток мгновенного сгорания, А
Объемный (провод)	0,070	0,25	15

Печатный из фольги электролитической медной	0,075	0,30	60
Печатный, осажденный из ванны	0,075	1,0	25

Анализ данных из табл. 17 позволяет сделать вывод о том, что при одинаковом поперечном сечении наиболее пригоден для сильноточных цепей печатный проводник из фольги электролитической медной, так как имеет большую поверхность теплоотдачи, что способствует отводу тепла, а также его структура менее рыхлая, чем у осажденного из ванны.

Рассмотрим полуаддитивный метод изготовления печатных плат.

Очень перспективен метод **фотоформ**, который заключается в восстановлении на поверхности нефольгированного диэлектрика из водных растворов солей металлов ионов, образующих рисунок толщиной 0,2–0,5 мкм. Затем следует химическое осаждение слоя меди. Метод имеет наивысшую разрешающую способность.

Различные модификации метода фотоформования связаны с различными способами формирования рисунка: фотоосаждение металлов, проявление и восстановление ионов, нормирование лучом лазера, фотоформинг.

Многолетняя практика показала, что в процессе изготовления ПП 60–70 % меди стравливается, что приводит к большому расходу травильных растворов и загрязнению окружающей среды, так как системы очистки и регенерации сложны и очень дороги, поэтому регенерация меди из травильных растворов экономически оправдана только для крупносерийного и массового производств.

Наличие эффекта подтравливания медных элементов (дорожек и контактных площадок под рисунком) ограничивает плотность монтажа, что противоречит основной тенденции развития РЭС. Одним из важнейших вариантов решения этой проблемы стало создание новых нефольгированных материалов – стеклотекстолитов с адгезивом. Основой адгезива служит эпоксид-каучуковая композиция. При химической обработке адгезива (подтравливании) образуется шероховатая поверхность, которая обеспечивает надежное сцепление химически осажденной меди с подложкой. Процесс начинается со стандартной подготовки заготовок – обезжиривания. Далее следуют операции промывки горячей и холодной водой. А затем проводится характерная только для материалов с адгезивом

операция набухания в ди-метилформамиде или в его водном растворе. При обработке растворитель, проникая между эпоксидными и каучуковыми цепями, разрыхляет адгезив. Для образования шероховатой поверхности заготовки подтравливают в специальном растворе (хромовый ангидрид и серная кислота). Далее следуют промывка, нейтрализация, промывка. Все последующие операции проводятся по базовой технологии, начиная с химического меднения. Основным ограничением для применения этого метода являются нестабильность свойств адгезива, ограниченный срок хранения материала и сравнительно высокая стоимость.

Рассмотрим последовательность операций при изготовлении ПП различными методами (табл. 18).

В табл. 18 приняты следующие обозначения: I – предусматривает нанесение рисунка ПП после сверления и металлизации отверстий; II – предусматривает нанесение рисунка и покрытие его лаком перед сверлением.

Таблица 18

Технологические операции изготовления печатных плат

Операции	Комбинированный позитивный		Комбинированный негативный	Химический
	I	II		
1. Изготовление заготовок и выполнение базовых отверстий	+	+	+	+
2. Нанесение лака	–	+	+	–
3. Выполнение отверстий	+	+	+	+
4. Зенкование	–	+	+	–
5. Подготовка поверхности	+	+	+	–
6. Химическое меднение	+	+	+	–
7. Гальваническое медне-	+	–	–	–
8. Удаление лака	–	+	+	–
9. Подготовка поверхности	+	+	+	–
10. Получение рисунка	+	+	+	+
11. Гальваническое медне-	+	+	+	–
12. Гальваническое осаждение сплава олово-свинец	+	+	–	–
13. Удаление защитного рисунка	+	+	+	+

14. Травление меди	+	+	+	+
15. Оплавление сплава оло-	+	+	–	–
16. Нанесение эпоксидной	–	–	–	+
17. Нанесение сплава Розе	–	–	+	+
18. Обрезка контура, меха-	+	+	+	+
19. Маркировка	+	+	+	+
20. Контроль на соответст-	+	+	+	+
21. Нанесение защитного технологического покрытия	+	+	+	–

Остановимся более подробно на основных операциях данного технологического процесса.

Химической металлизации подвергают в основном материалы, не проводящие электричества, керамику и пластмассу. Химическая металлизация основывается на окислительно-восстановительной реакции, при которой необходимые для восстановления катионов металла электроны образуются в результате окисления в водном растворе. По типу реакции осаждение от источника электронов различают:

- осаждение методом погружения,
- контактную металлизацию,
- восстановительное осаждение.

Для создания межслойных переходов в ПП и для изготовления плат аддитивным методом используют восстановительную ванну для осаждения. При этой форме химической металлизации необходимые для восстановления ионов электроны образуются в результате сложных окислительно-восстановительных реакций, которые протекают на основе добавки жидких восстановителей в водный раствор, содержащий ионы меди.

При температуре ванны в 35–40 °С получается за 30 мин слой меди толщиной 0,5 мкм. Медь восстанавливается в соответствии с уравнением из раствора с помощью формальдегида:

$$Cu^{++} + 4OH^{-} + 2HCOH \rightarrow Cu + 2HCOO^{-} + H_2 + 2H_2O$$

В результате нежелательной побочной реакции может образовываться окись меди Cu_2O:

$$2Cu^{++} + 5OH^{-} + HCOH \rightarrow Cu_2O + HCOO^{-} + 3H_2O$$

Эту реакцию можно предотвратить, контролируя состояние

ванны (концентрацию, температуры и величину pH) и добавляя буферные вещества и комплексообразователи. Обычный состав восстановительной ванны для меднения содержит:

- сульфат меди $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 25 г/л (соль металла);
- сегнетову соль $KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$ 50 г/л (комплексообразователь);
- раствор едкого натра $NaOH$ 33 г/л;
- тиосульфат натрия $Na_2S_2O_3$ 4 мл/л;
- формальдегид HCHO 100 мл/л (восстановитель).

Количественно процессы **гальванической металлизации** описывают законы Фарадея, согласно которым масса вещества, выделившегося при электролизе прямо пропорциональна количеству прошедшего электричества It, а осажденные, равные количествам электричества массы вещества относятся как химические эквиваленты этих веществ (Al). Таким образом, $m = kIt$, где k – теоретический электрохимический эквивалент, определяемый из соотношения

$$k = \mathrm{Al} / F,$$

где F – постоянная Фарадея*, F = 96 500 Кл/г·атом. Для двухвалентной меди k = 1,186 г/Кл.

Основой для гальванической металлизации является водный раствор солей металла, содержащий осаждаемый материал в виде положительно заряженных ионов. Необходимые для восстановления электроны поступают от внешнего источника постоянного тока. Под действием внешнего напряжения ионы металла движутся к катоду, присоединяют электроны и осаждаются на нем как нейтральные атомы. Примером может служить восстановление меди

$$Cu^{++} + 2\bar{e} \rightarrow Cu$$

В качестве анода преимущественно используют осаждаемый материал, катодом является предмет, подлежащий покрытию, например, печатная плата.

Химическое осаждение металла на поверхность диэлектриков

---

* **Постоянная ФАРАДЕЯ (Фарадея число)** – произведение элементарного электрического заряда e на число Авогадро NA; постоянная Фарадея определяет количество электричества, прохождение которого через раствор электролита приводит к выделению на электроде 1 моля одновалентного вещества. Названа в честь М. Фарадея. В углеродной шкале атмосферная масса постоянной Фарадея F = (96 485,309 + 0,029) Кл/моль.

можно проводить после тщательной подготовки поверхности, которая включает обезжиривание и активацию поверхности. Активация может быть двухступенчатой или одноступенчатой. Для создания чистой металлической поверхности медный слой подтравливают, например, в персульфате аммония, что придает медным поверхностям шероховатость, улучшающую их сцепление с наносимыми далее слоями. После нескольких травлений поверхность необходимо хорошо промыть, декапировать и еще раз промыть. Затем следует первый цикл активации – сенсибилизация.

Сенсибилизация предназначена для придания заготовке способности к металлизации. При обработке в растворе двухлористого олова происходит гидролиз соли, продукты которого обладают сильными восстановительными свойствами. Драгметаллы на активации легко восстанавливаются, относительно плохо пассивируются и являются хорошими проводниками.

Плата опускается на 2–3 мин в солянокислый раствор дихлорида олова (10 г/л $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ и 40 мл/л HCl концентрированной). После сенсибилизации на поверхности образуется нерастворимая и несмываемая гидроокись олова $SnCl_2 + 2H_2O \rightarrow Sn(OH)_2 + 2HCl$. После сенсибилизации плату промывают и проводят второй шаг – активацию поверхности в солянокислом растворе дихлорида палладия (0,5 г/л $PdCl_2$ и 3 мл/л HCl концентрированной). Адсорбированные на поверхности платы ионы олова восстанавливают ионы палладия

$$Sn^{++} + Pd^{++} \rightarrow Sn^{4+} + Pd$$

Атомы палладия являются высокоактивным катализатором для химической металлизации на поверхности диэлектрика. Для активации применяют также раствор азотно-кислого серебра, атомы которого наравне с палладием обладают указанными свойствами.

При одноступенчатой активации предварительная обработка остается такой же. Одноступенчатая активация проводится в коллоидном растворе, который содержит HCl, катионы Sn^{++}, Sn^{4+} и Pd в коллоидной форме. Ванну не подвергают регенерации, а эксплуатируют до полной выработки.

Точность получаемого рисунка изображения печатных плат определяет процессы получения рисунка.

Химическое меднение ПП является одним из узких мест в процессе их изготовления. Нестационарность процесса и его многофакторность обусловливают сложность управления им и нестабильность качества металлизации.

На скорость процесса оказывают влияние температура раствора химического меднения, наличие продуктов разложения и подготовка поверхности основы перед покрытием, а также группа взаимодействий. Можно рекомендовать следующую технологию процесса скоростного химического меднения (состав растворов в г/л):

1) травление: $H_2SO_4 - 75$ $HF - 18$ (подготовка поверхности);

2) сенсибилизация: $SnCl_2 - 25$, $HCl - 17$;

3) активация: $PdCl_2 - 0{,}8$, $HCl - 2$;

4) химическое меднение: $CuSO_4 \cdot 5H_2O - 35$, $NaOH - 45$, $NiSO_4 \cdot 6H_2O - 6$, $K - NA$ виннокислый – 190, HCHO (40 %) – 15 мл/л, Na_2SO_3 – 0,001, $CH_3OH - 1{,}5$, HCOOH – 5,5; pH – 12,5. Скорость процесса – 5,0 мкм/ч.

Химическое осаждение меди основано на восстановлении формальдегидом ионов двухвалентной меди из ее комплексных солей.

Основные компоненты раствора для химического осаждения меди: соль меди, щелочь, комплексообразователь или их смесь (нитраты, глицерин и т.д.), формальдегид, сода, стабилизатор.

Сода служит буферной добавкой и несколько повышает скорость химического меднения. Комплексообразователь предназначен для того, чтобы предотвратить выпадение гидроокиси металлов в щелочном растворе.

Рассмотрим состав травильных ванн на основе $NaMnO_4$, используемый для удаления остатков смолы, наволакиваемых при сверлении отверстий и подтравливании диэлектрика стенок отверстий. В состав травильного водного щелочного раствора входят гидрат окиси щелочного металла (NaOH или KOH), $NaMnO_4$ и 0,1–0,3 моль ионов из группы K^+, C^+, Rb^+ или их смеси на моль MnO_4^-. Обработка ПП в травильном растворе включает в себя:

1) предварительную чистку в предлагаемом растворе для удаления загрязнений и масляных пятен;

2) промывку для удаления травильного раствора;

3) погружение ПП в травильный раствор для удаления остатков смолы (1–5 мин) и для подтравливания диэлектрика (5–10 мин) при температуре ванны 77 °С;

4) промывку ПП для нейтрализации остатков $NaMnO_4$ и MnO_2 в слабом растворе серной кислоты с добавлением восстановительных агентов и последующей промывкой ПП.

3.6. Особенности производства многослойных печатных плат

3.6.1. Получение внутренних слоев печатных плат

При изготовлении односторонних и двусторонних слоев МПП наиболее широко используют негативный метод (рис. 24).

Для получения двусторонних слоев МПП с металлизированными переходами используют позитивный метод – вытравливание проводящего рисунка по металлорезисту, осажденному на поверхность медных проводников и на стенки металлизированных отверстий, сформированных в рельефе пленочного фоторезиста (рис. 25).

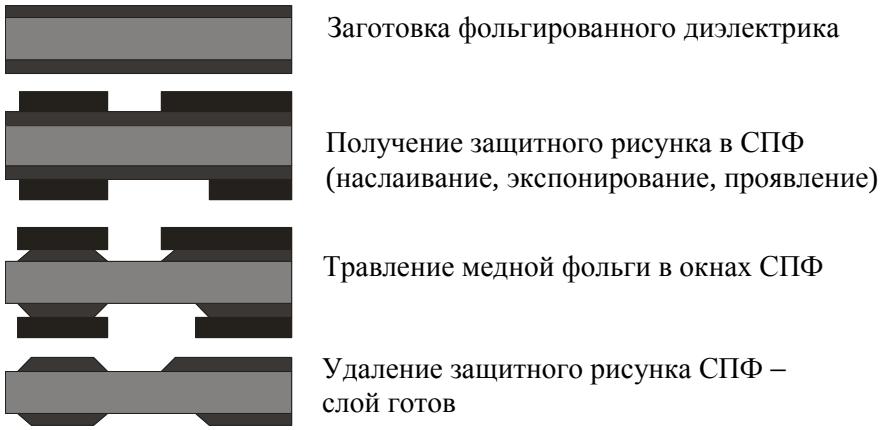


Рис. 24. Технологическая схема изготовления слоев субтрактивным методом с использованием сухого пленочного фоторезиста (негативный метод)

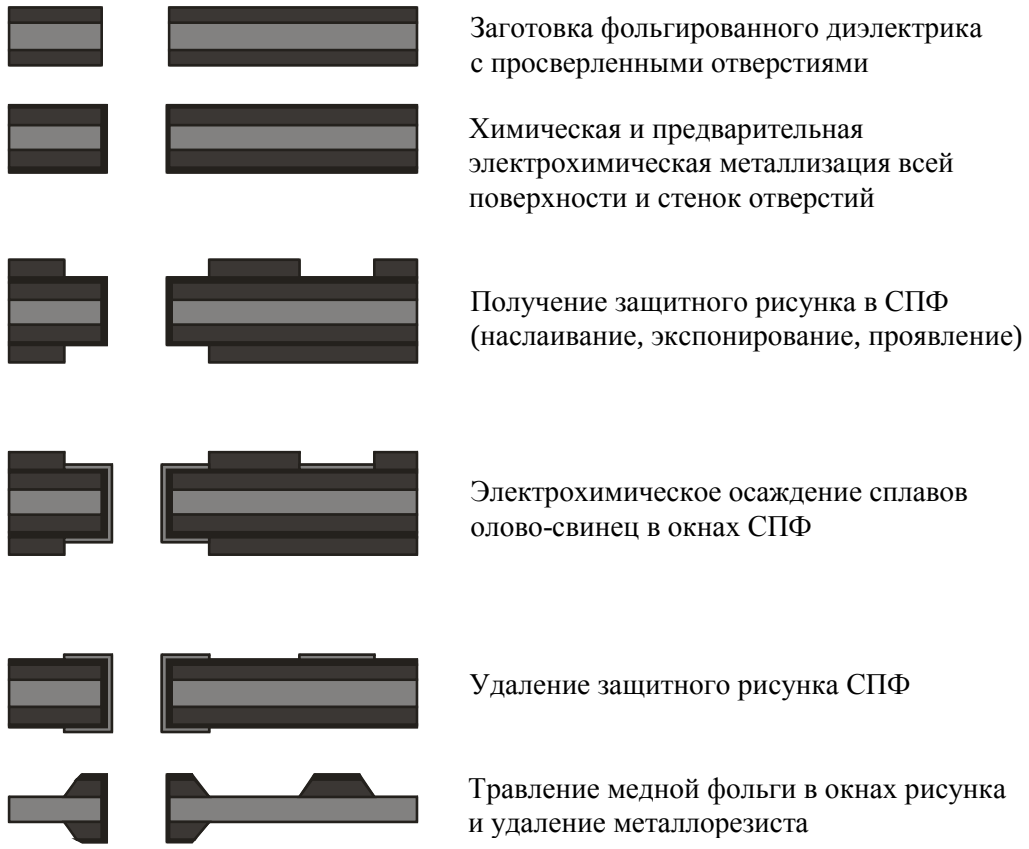


Рис. 25. Технологическая схема изготовления слоев субтрактивным методом с использованием металлорезиста олово-свинец (позитивный метод)

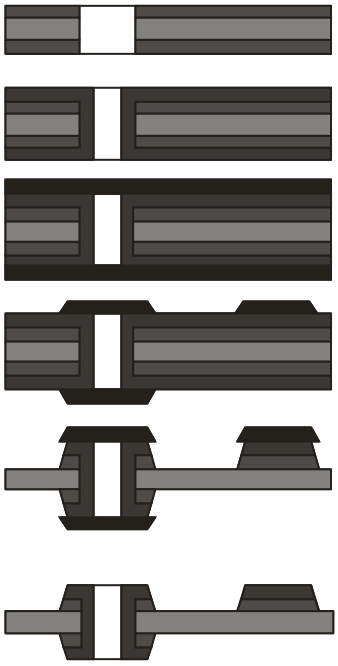
Как и в первом варианте, пленочный фоторезист наслаивается на заготовки фольгированного диэлектрика, прошедшие операции сверления отверстий и предварительной (5–7 мкм) металлизации медью стенок отверстий и всей поверхности фольги. В процессе фотолитографии резиста защитный рельеф получают на местах поверхности металлизированной фольги, подлежащей последующему удалению травлением.

Проводящий рисунок формируется последовательным осаждением меди и металлорезиста по рисунку освобождений в рельефе пленочного фоторезиста и на поверхность стенок отверстий. После удаления пленочного фоторезиста не защищенные металлорезистом слои меди вытравливаются.

В двусторонних слоях с межслойными переходами проводящий рисунок получают также путем травления медной фольги с гальванически осажденным сплошным слоем меди по защитному изображению рисунка схемы и с защитными завесками над металлизированными отверстиями в пленочном фоторезисте (рис. 26).

В этом так называемом тентинг-процессе, или методе образования завесок над отверстиями, в заготовках фольгированного диэлектрика сверлят отверстия и после химической металлизации стенок отверстий производят электролитическое доращивание меди до требуемой толщины (35–40 мкм) в отверстиях и на поверхности фольги по всей заготовке фольгированного диэлектрика. После этого наслаивается фоторезист для получения защитного изображения схемы и защитных завесок над металлизированными отверстиями. По полученному защитному изображению в пленочном фоторезисте производят травление меди с пробельных мест схемы. Образованные фоторезистом завески защищают металлизированные отверстия от воздействия травящего раствора в процессе травления.

Для получения изображений используется пленочный фоторезист толщиной 15–50 мкм. Толщина фоторезиста в случае тентинг-метода диктуется требованиями целостности защитных завесок над отверстиями на операциях проявления и травления, проводимых разбрызгиванием растворов под давлением 1,6–2 атм и более. Фоторезисты толщиной менее 45–50 мкм на этих операциях над отверстиями разрушаются. Для обеспечения надежного тентинга диаметр контактной площадки должен быть в 1,4 раза больше диаметра отверстия. Минимальный поясок изображения контактной площадки (ширина между краем контактной площадки и отверстием) должен быть не менее 0,1 мм.



Заготовка фольгированного диэлектрика с просверленными отверстиями

Химическо-электрохимическая металлизация всей поверхности и стенок отверстий

Напаивание пленочного фоторезиста

Получение защитного рисунка в СПФ (экспонирование, проявление)

Травление медной фольги в окнах СПФ

Удаление защитного рисунка СПФ – слой готов

Рис. 26. Технологическая схема изготовления слоев тентинг-методом с использованием сухого пленочного фоторезиста (негативный метод)

Применение тентинг-метода обеспечивает:

- упрощение технологического процесса изготовления двусторонних слоев с металлизированными переходами и МПП;
- уменьшение количества необходимых химикатов;
- медную поверхность под нанесение паяльной маски («резиста-защиты»);
- возможность иммерсионного золочения и химического никелирования ПП с нанесенными слоями паяльной маски;
- однородную толщину проводников на всей поверхности платы независимо от плотности рисунка;
- высокое качество пластичности гальванически осаждаемой меди, так как металлизация осуществляется без органического фоторезиста на поверхности.

Для реализации тентинг-метода необходимо:

- обеспечить гарантированное запечатывание отверстий пленочным фоторезистом;
- обеспечить достаточную развитость металлизированной поверхности для того, чтобы гарантировать хорошее сцепление наслаиваемого фоторезиста;
- конструкционное обеспечение зоны перекрытия фоторезистом защищаемого отверстия;
- высокое качество кромки металлизированного отверстия – очень малый заусенец;
- необходимо использовать толстый, эластичный и прочный пленочный фоторезист.

Профиль поперечного сечения проводников, сформированный травлением по защитному изображению в резисте, имеет форму трапеции, расположенной большим основанием на поверхности диэлектрика. При травлении фольги толщиной 5 мкм величина разброса ширины – порядка 7 мкм, при травлении фольги толщиной 20 мкм разброс составляет 30 мкм, а при травлении фольги толщиной 35 мкм разброс составляет около 50 мкм. Искажения ширины медных проводников по отношению к размерам последних в фоторезисте и на фотошаблоне смещаются в сторону заужения.

Следовательно, при субтрактивной технологии получения печатных элементов в готовых слоях с заданной шириной необходимо в размеры изображений на фотошаблоне вводить величину зауженния, т.е. к номинальному значению ширины проводника прибавлять величину зауженния.

Минимально воспроизводимая ширина проводников и зазоров при субтрактивной технологии порядка 50 мкм при толщине проводников 5–9 мкм, 100–125 мкм – при толщине проводников 20–35 мкм или 150–200 мкм – при толщине проводников 50 мкм. Для получения логических слоев с металлизированными переходами с более плотным печатным рисунком, шириной проводников 125 мкм и менее, например, 100 мкм при их толщине 50 мкм, используется технологический процесс по субтрактивной технологии травлением по металлорезисту с использованием диэлектрика с тонкомерной фольгой толщиной 5–9 мкм. В этом случае предварительная металлизация стенок отверстий и поверхности фольги заготовок диэлектрика производится на минимально возможную толщину – 8–10 мкм. Условия получения изображения в пленочном фоторезисте отличны от условий тентинг-процесса, а именно: для получения изображений используются тонкие пленочные фоторезисты с более высоким разрешением и гальваностойкостью. Подготовка поверхности подложки под наслаивание пленочного фоторезиста из-за небольшой толщины фольги и металлизированного слоя проводится химическим способом (во избежание их повреждения).

3.6.2. Метод ПАФОС

Для изготовления ПП с шириной проводников и зазоров 50–100 мкм и толщиной проводников 30–50 мкм используют метод ПАФОС. Это электрохимический метод, по которому проводники и изоляция между ними (диэлектрик) формируются аддитивно, т.е. селективным гальваническим осаждением проводников и формированием изоляции прессованием только в необходимых местах. Метод ПАФОС (как аддитивный метод) принципиально отличается от субтрактивного тем, что металл проводников наносится, а не вытравливается.

Проводящий рисунок формируется гальваническим осаждением тонкого слоя никеля толщиной 2–3 мкм и меди толщиной 30–50 мкм по рисунку освобождений в рельефе пленочного фоторе-

зиста, полученного на временных «носителях» – листах из нержавеющей стали, поверхность которых предварительно покрывается гальванически осажденной медной шиной толщиной 2–20 мкм. В защитном рельефе пленочного фоторезиста на верхнюю поверхность сформированных проводников также производится нанесение адгезионных слоев (оксидирование). После этого пленочный фоторезист удаляется, и проводящий рисунок на всю толщину впрессовывается в препрег или другой диэлектрик. Прессованный слой вместе с медной шиной механически отделяется от поверхности носителей.

В случае слоев без межслойных переходов медная шина стравливается (схема процесса приведена на рис. 27). При изготовлении двусторонних слоев с межслойными переходами перед травлением тонкой медной шины проводятся операции получения межслойных переходов металлизацией отверстий с контактными площадками, после чего медные шины стравливаются (рис. 28). Проводящий рисунок, утопленный в диэлектрик и сверху защищенный слоем никеля, при травлении медной шины не подвергается воздействию травильного раствора. Поэтому форма, размеры и точность проводящего рисунка определяются только формой и размерами освобождений в рельефе пленочного фоторезиста, т.е. процессами фотохимии.

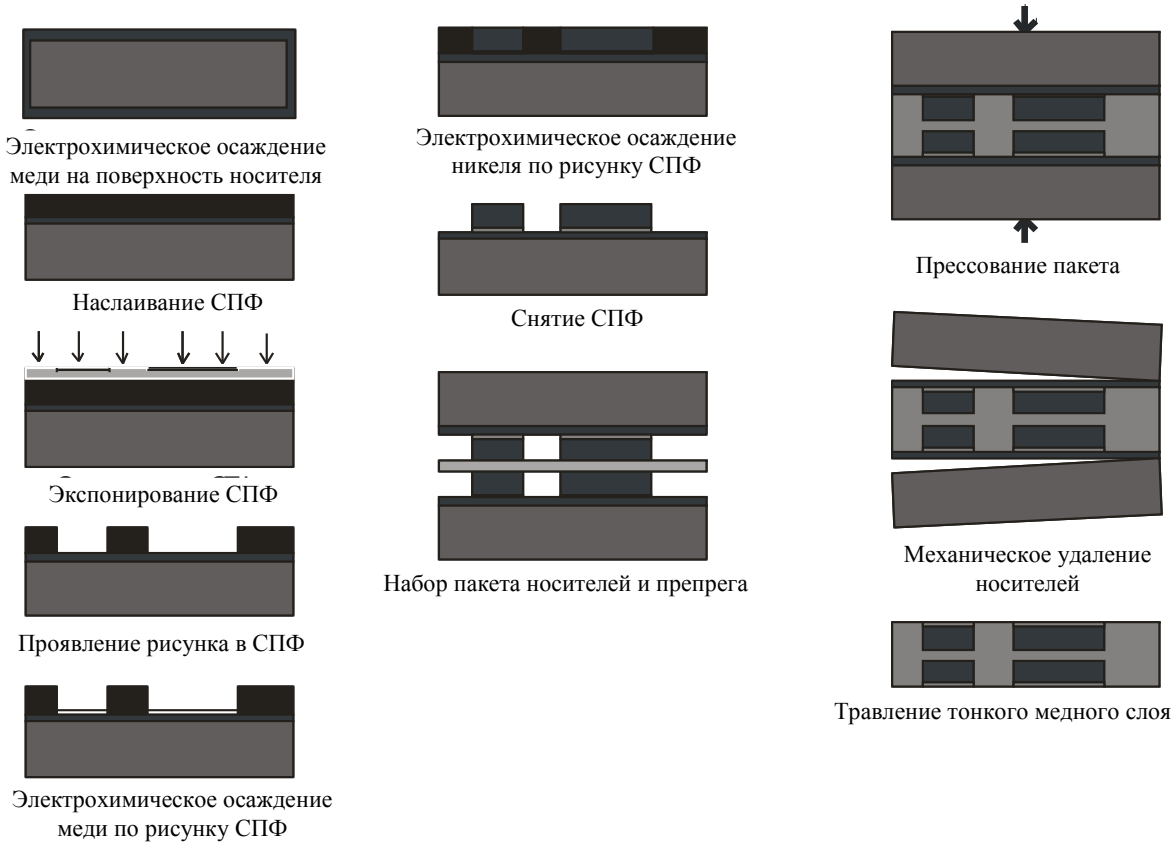


Рис. 27. Технологическая схема изготовления слоев методом ПАФОС

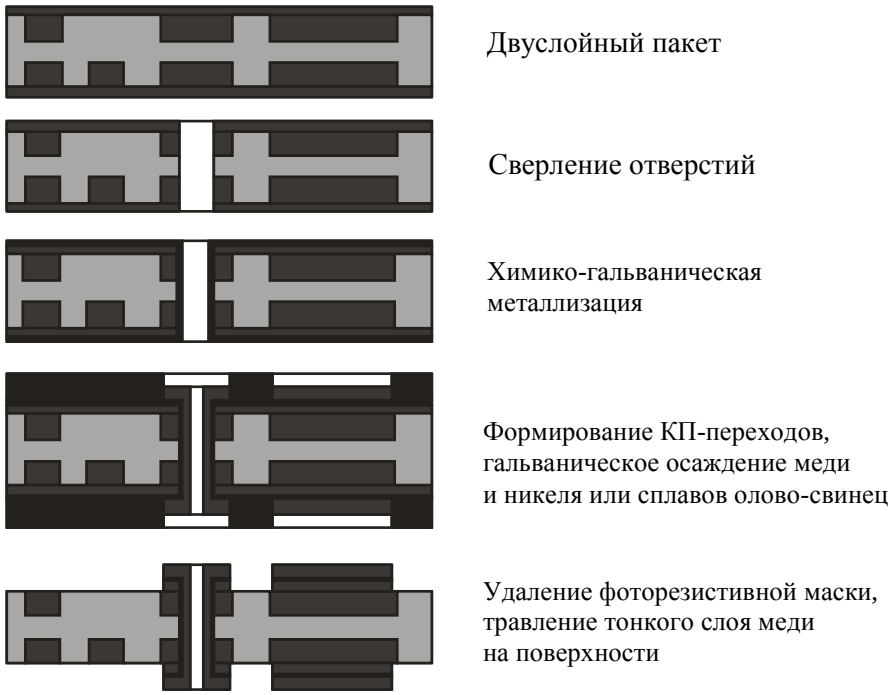


Рис. 28. Формирование переходов в двуслойном пакете, изготовленном методом ПАФОС

При обеспечении правильных условий проведения процессов получения изображений в пленочных фоторезистах достигается следующее:

- ширина гальванически сформированных проводников в фоторельефе пленочных фоторезистов на высоте между уровнями от 0,2 до 0,7 толщины фоторезиста равна ширине изображения проводника на фотошаблоне, интервал разброса замеров не превышает 5–10 мкм;
- искажения ширины проводников на поверхности подложки относительно размеров на фотошаблоне в среднем составляют от 10 мкм до 20 мкм;
- суммарный интервал разброса ширины проводников по всей высоте не превышает 15–20 мкм.

3.6.3. Получение наружных слоев печатных плат

Заготовки двусторонних ПП и прессованные пакеты МПП имеют на поверхности медную фольгу, обычно толщиной 5, 20 или 35 мкм. После сверления и металлизации сквозных межслойных переходов толщина медного слоя в отверстии составляет от 30 до 70 мкм.

Технологическая схема получения проводников наружных слоев ПП с межслойными переходами (сквозными металлизированными отверстиями) по технологической последовательности выполнения операций похожа на приведенный выше метод позитивной субтрактивной технологии (рис. 29) или на тентинг-метод (рис. 30, 31). Предварительная металлизация сверленных пакетов многослойных плат по поверхности фольги или медной шины и по поверхности стенок отверстий производится на толщину от 7 до 10 мкм.

Эта толщина диктуется, с одной стороны, требованиями сохранения межслойных переходов при последующих операциях обработки, с другой – требованиями минимальной толщины медных слоев, подлежащих травлению (для уменьшения бокового подтрава проводников). Остальная часть проводника одновременно с увеличением толщины металлизации на стенках отверстий формируется последовательным гальваническим осаждением меди на толщину от 10 до 30 мкм и металлорезиста ПОС-61 на толщину от 9 до 12 мкм. Для того чтобы проводящий рисунок не наращивался выше фоторельефа, используются толстые фоторезисты (толщиной от 40 до 50 мкм).

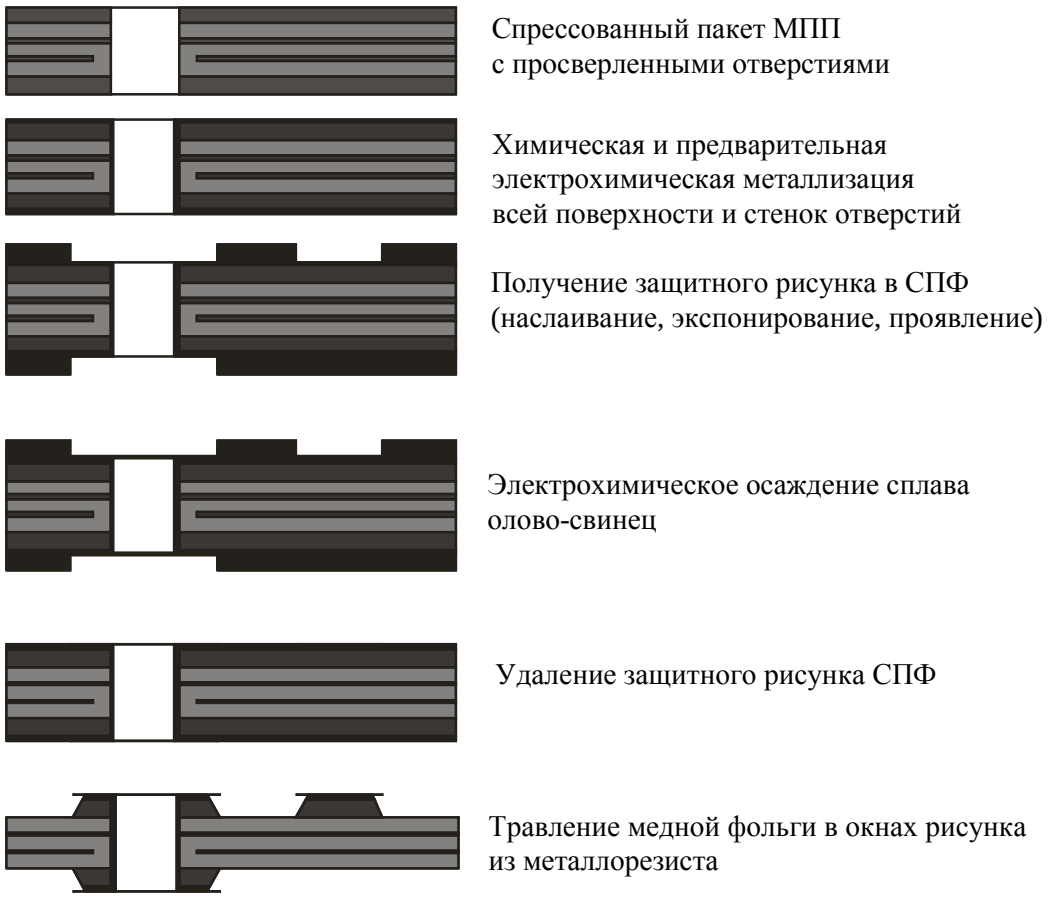


Рис. 29. Технологическая схема изготовления МПП субтрактивным методом с использованием металлорезиста олово-свинец (позитивный метод)

Гальванически сформированная часть печатных элементов определяется размерами освобождений в фоторельефе. При правильно подобранных режимах получения изображения в пленочном фоторезисте ширина проводника по металлорезисту равна размерам изображения на фотошаблоне. В процессе травления происходит одновременное травление выступающих проводников с боков. Величина бокового подтрава соизмерима с глубиной травления, т.е. равна суммарной толщине медных слоев. Для плат, изготовленных по субтрактивной технологии с металлорезистом, среднее значение ширины проводников на готовых платах после удаления металлорезиста на 40–60 мкм меньше, чем на фотошаблоне.

Обычно применяемая многими в России маршрутная схема изготовления МПП позитивным методом показана на рис. 32, а маршрутная схема изготовления МПП тентинг-методом – на рис. 33.

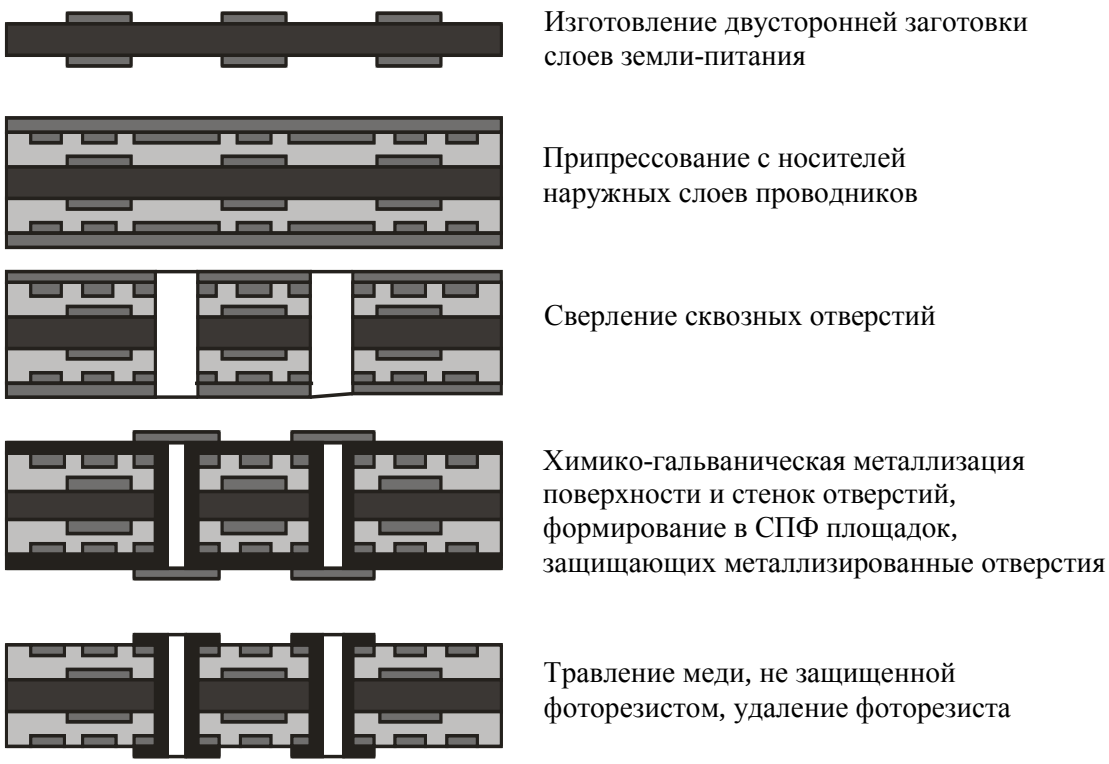


Рис. 30. Технологическая схема изготовления МПП тентинг-методом с использованием сухого пленочного фоторезиста (негативный метод)

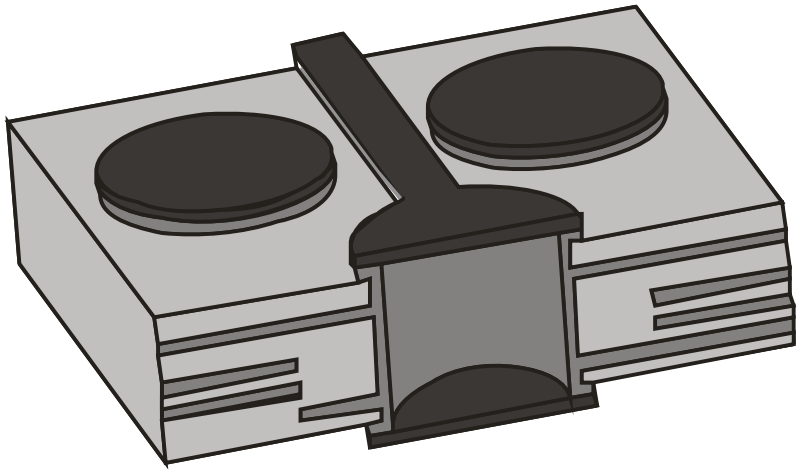


Рис. 31. Фрагмент технологической схемы изготовления МПП тентинг-методом после стравливания меди с пробельных мест. Видны запечатанные метализированные отверстия

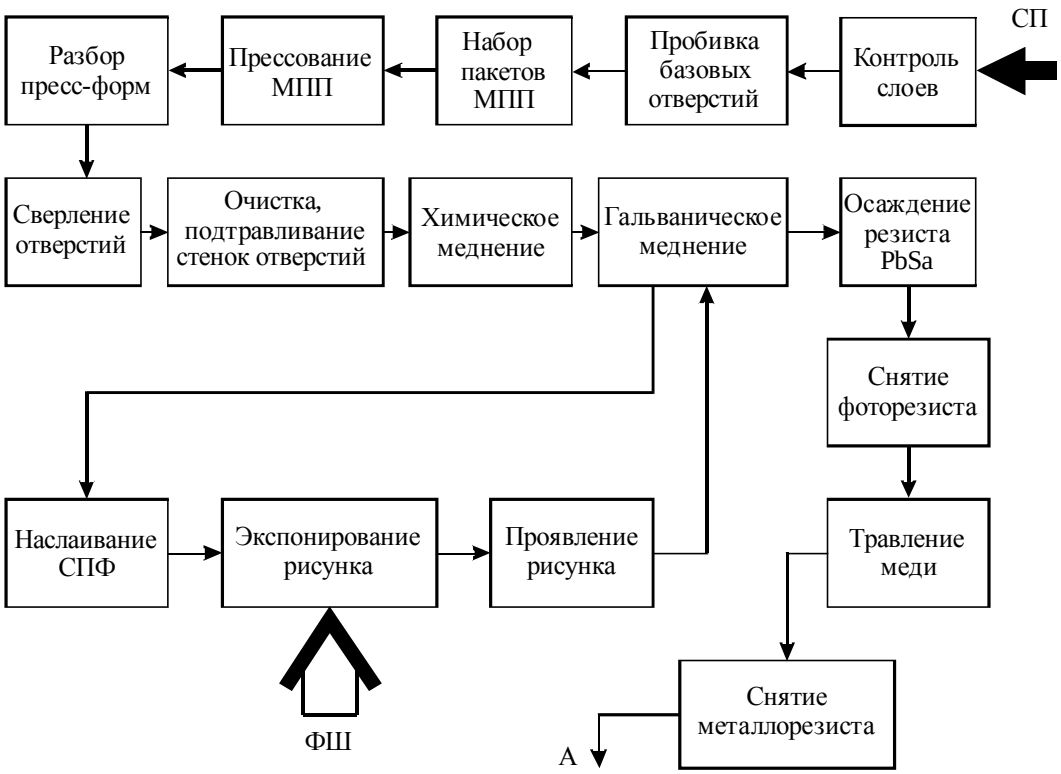


Рис. 32. Маршрутная блок-схема изготовления МПП позитивным методом:
СЛ – поступление слоев; Фш – поступление фотошаблонов;
А – переход на нанесение паяльной маски, маркировку и лужение

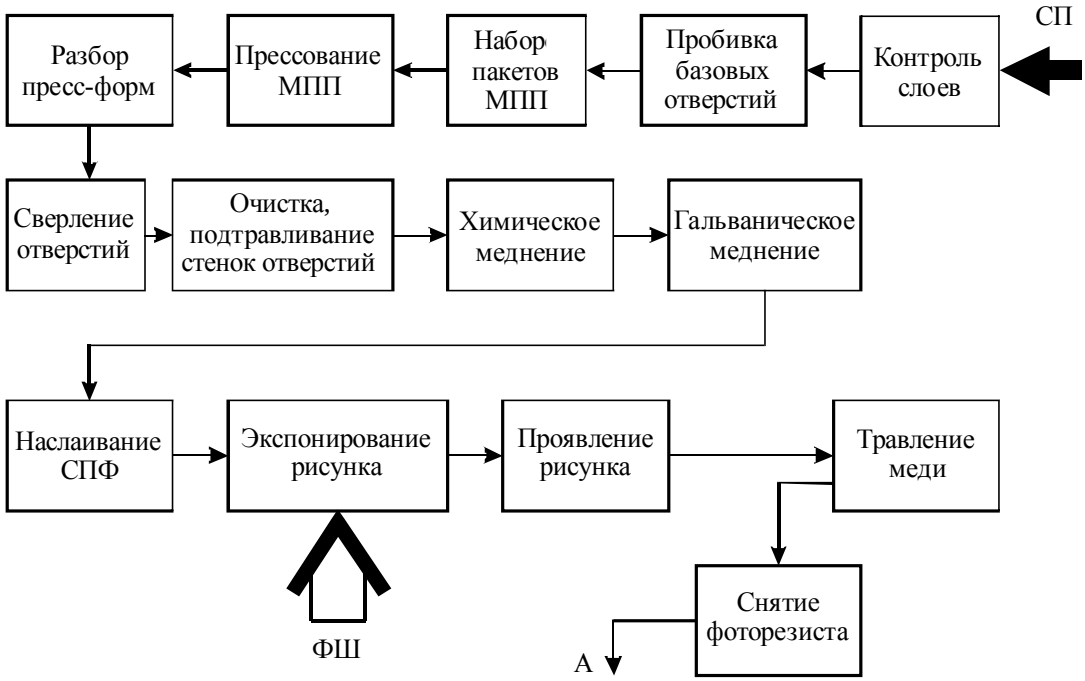


Рис. 33. Маршрутная блок-схема изготовления МПП тентинг-методом

В тентинг-процессе металлизируются вся поверхность и отверстия заготовки ПП без использования экологически агрессивных процессов осаждения металлорезистов. Защита рисунка при травлении обеспечивается пленочным фоторезистом, накрывающим проводники и отверстия. Форма пленки фоторезиста, защищающего отверстия, напоминает зонтик. Поэтому в названии процесса есть слово tent – зонтик. Травление рисунка по фоторезисту производится в кислых травителях хлорида меди, которые легко поддаются регенерации и утилизации.

Тентинг-процесс хорошо сочетается с процессом прямой металлизации без химического осаждения меди. Сущность последнего состоит в отсутствии процессов химической металлизации. Проводимость поверхности стенок отверстий обеспечивается осаждением тонкодиспергированного палладия. Процессы осаждения палладия при прямой металлизации аналогичны известным процессам активации для химической металлизации. Различаются процессы тем, что при прямой металлизации палладий образует сплошной, очень тонкий проводящий слой, обеспечивающий последующие электрохимические процессы металлизации.

При этом расход палладия не увеличивается.

Тентинг-процесс в сочетании с прямой металлизацией широко распространен за рубежом и начинает применяться в России. Это наиболее прогрессивный метод изготовления относительно простых ПП (до четвртого класса включительно). В тентинг-процессе приходится формировать проводники и зазоры, вытравливая «бутерброд», который складывается из толщины фольги (18 мкм) и толщины общей металлизации (35–40 мкм). Наличие подтравливания затрудняет получение тонкого рисунка (проводник/зазор 0,12/0,12 мм).

Используя комбинированный позитивный метод, можно получить более тонкие проводники и зазоры (0,1/0,1 мм). При этом вытравливание зазоров (пробельных мест) производится из меньших толщин: фольга (18 мкм) плюс гальваническая затяжка (6 мкм).

С появлением BGA-компонентов появилась потребность в воспроизведении еще более тонких проводников: 0,08–0,05 мм, которая обусловлена очень маленьким шагом шариковых выводов BGA-компонентов (рис. 34).

В этом случае эффективно применение полуаддитивной технологии (рис. 35) с использованием нефольгированных наружных поверхностей ПП. Поскольку химически металлизируемые поверхности в полуаддитивном методе значительно больше, чем в субтрактивном, для наружных слоев приходится применять специальные материалы, которые заранее активированы дешевыми катализаторами (например, на основе меди).

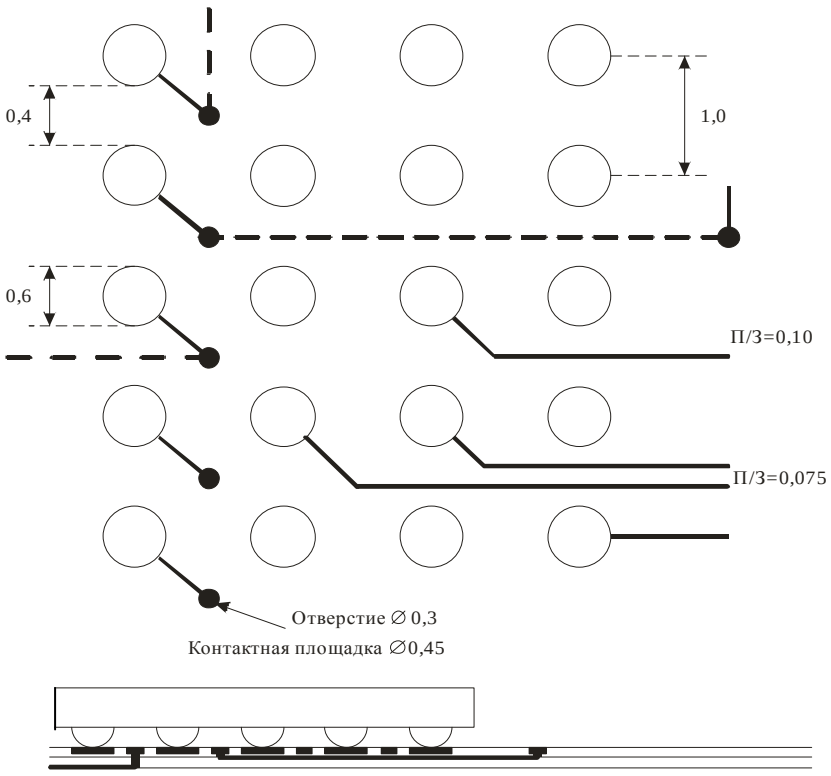


Рис. 34. Топология связей для монтажа BGA-компонентов

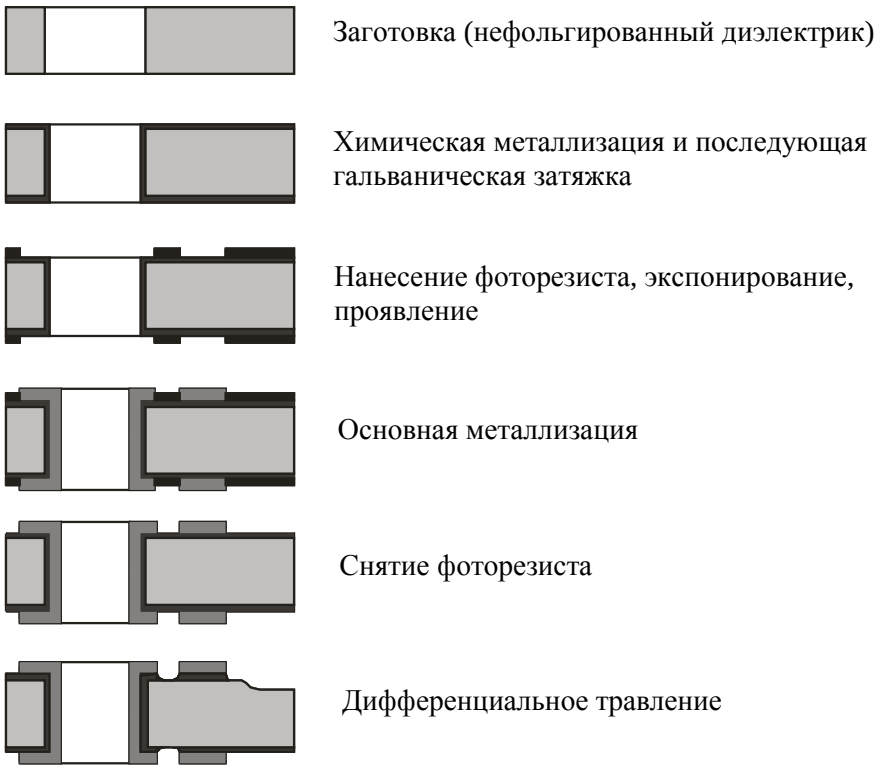


Рис. 35. Схема полуаддитивной технологии с дифференциальным травлением

3.6.4. Паяльные маски для наружных слоев печатных плат

Введение в конструкцию ПП паяльной маски является необходимым условием, так как обычная стекло-эпоксидная основа печатных плат не обладает достаточной теплостойкостью при температурах пайки (220–240 °С), и без паяльной маски за время, необходимое для проведения техпроцесса пайки (0,5–2,5 мин), может происходить поверхностная деструкция материала диэлектрика.

По методу формирования рисунка паяльные маски делятся на два типа:

- рисунок формируется методом трафаретной печати. Как правило, это составы на эпоксидной основе, отверждаемые термически или ультрафиолетовым излучением; при относительной дешевизне основным их недостатком является низкая разрешающая способность и необходимость использования сеткографического трафарета;
- рисунок формируется фотолитографическим методом (фоторезистивные паяльные маски). Эти паяльные маски позволяют формировать рисунок любой сложности, в последнее время они получили наибольшее распространение. Фоторезистивные паяльные маски по методу нанесения делятся на сухие и жидкие.

Для нанесения паяемого покрытия на медную поверхность проводников ПП применяют несколько способов. Один из них – наиболее популярный метод – лужение с выравниванием припоя горячим воздухом (HAL, HASL).

При позитивном методе изготовления наружных слоев ПП перед нанесением расплавленного припоя после травления меди с пробельных мест удаляется олово-свинец со всех металлизированных поверхностей. Далее паяльная маска наносится на чистые медные проводники. Потом формируется рисунок защитного слоя, и вся ПП окунается в расплавленный 63/37 припой, который наносится на все поверхности, свободные от паяльной маски, – монтажные контактные площадки. Маршрутная схема процесса нанесения паяльной маски приведена на рис. 36.

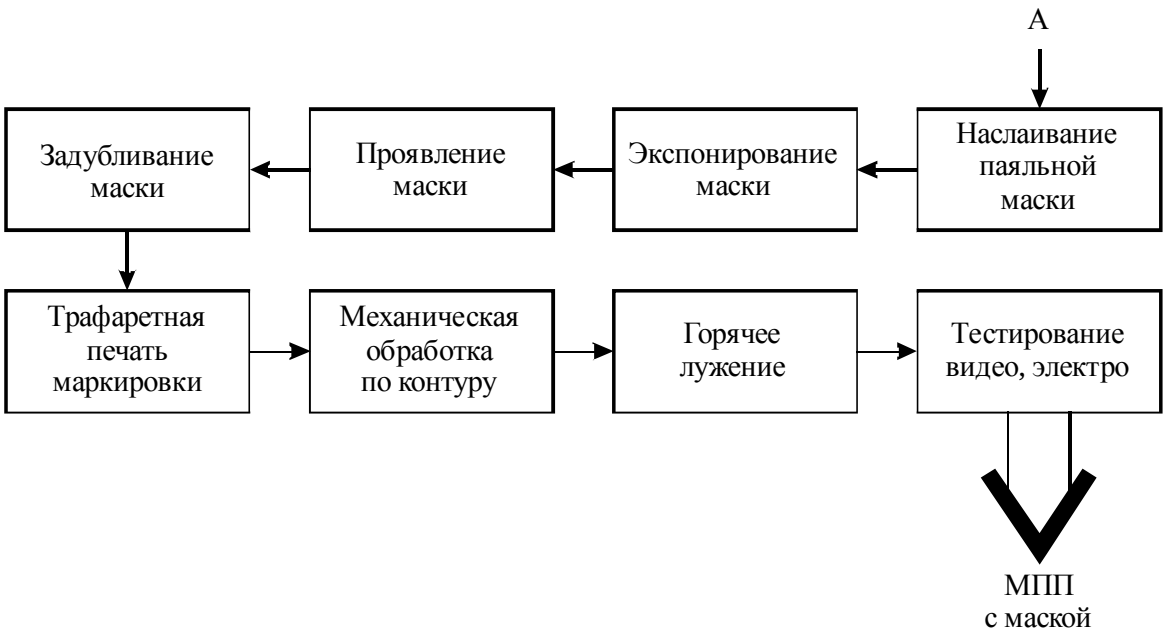


Рис. 36. Маршрутная блок-схема нанесения паяльной маски, маркировки, лужения и финишного контроля МПП

Многие российские производители ПП пытаются приспособить старую технологию оплавления металлорезиста олово-свинец для обеспечения хорошей паяемости покрытия и последующего нанесения паяльной маски. При этом они неизбежно сталкиваются с проблемами растрескивания и отслаивания паяльной маски от блестящей поверхности припоя или растекания припоя под паяльной маской при автоматизированном монтаже при пайке волной.

При тентинг-методе после травления рисунка операция снятия металлорезиста отсутствует, так как все проводники чисто медные. Поэтому одно из преимуществ этой технологии и лужения с выравниванием припоя в том, что уменьшается количество шагов обработки. Другое преимущество заключается в том, что припой не подвергается дополнительной химической обработке, которая могла бы загрязнить поверхность или изменить состав сплава. Кроме того, здесь меньше термических воздействий, способных вызвать рост интерметаллидов. Контактные площадки после этого процесса имеют отличную способность к смачиванию.

3.7. Выбор технологических методов в производстве печатных плат

Разнообразие базовых методов изготовления печатных плат зачастую ставит перед необходимостью выбора схемы процесса для воспроизведения рисунка заданного класса точности. При выборе можно руководствоваться рядом критериев, оговоренных в ГОСТ 237–51.

Попытаемся оценить возможности известных схем производства исходя из одного критерия – точность воспроизведения рисунка проводника и зазора. Рассмотрены четыре схемы:

- тентинг-метод (с прямой металлизацией);
- комбинированный позитивный метод (с прямой металлизацией);
- комбинированный позитивный метод (с химической металлизацией);
- полуаддитивный метод с дифференциальным травлением.

Рассмотрено влияние толщины вытравливаемого металла для каждого из методов на воспроизводимость проводников и зазоров.

Будем считать, что разрешение фоторезиста (РФ) сравнимо с 4/3 его толщины:

$$\text{РФ} = \frac{4}{3}F. \tag{32}$$

Предположим, что величина вытравливаемого металла равна H. Известно, что величина подтравливания (ВП) рисунка сравнима с глубиной травления:

$$\text{ВП} = \frac{2}{3}H. \tag{33}$$

Теперь можно эмпирически получить формулу для оценки воспроизведения ширины зазора Z:

$$Z = \text{РФ} + 2 - \text{ВП}; \tag{34}$$

$$Z = \frac{4}{3}\cdot F + 2\cdot\frac{2}{3}\cdot H = \frac{4}{3}\cdot(F + H). \tag{35}$$

С целью обеспечения равнопрочности проводники и зазоры, как правило, выполняют равными по ширине. Поэтому, вытравив тонкие зазоры, можно с уверенностью сказать, что проводники мо-

гут быть воспроизведены по крайней мере с той же шириной или с большей. Для оценки воспроизведения тонких проводников достаточно умения правильно оценить ширину зазора.

Приведем пример численной оценки воспроизводимости зазора Z для тентинг-метода.

Тентинг-метод – самый дешевый и быстрый процесс изготовления печатных плат, при котором, помимо металлизации отверстий, происходит металлизация всей поверхности. Для тентинг-метода необходимо использовать толстопленочные фоторезисты (50 мкм), чтобы после проявления они смогли выдержать напор струй травящих растворов.

В тентинг-методе по известным соображениям используется фольгированный диэлектрик с толщиной фольги 18 мкм. После гальванического наращивания 35 мкм меди толщина вытравливаемого металла будет

$$H = 18 + 35 = 53 \text{ мкм}.$$

Используя формулу (32), получим разрешение фоторезиста

$$\text{РФ} = \frac{4}{3} \cdot 50 = 67 \text{ мкм}.$$

Используя формулу (33), получим величину подтравливания

$$\text{ВП} = \frac{2}{3} \cdot 53 = 35 \text{ мкм}.$$

Используя формулу (34), получим величину ширины зазора.

При тентинг-методе трудно ожидать воспроизводимость рисунка (П/З) лучше, чем 0,14/0,14 мм

$$Z = \text{РФ} + 2 \cdot \text{ВП} = 67 + 2 \cdot 35 = 137 \text{ мкм} = 0{,}14 \text{ мм}.$$

Комбинированный позитивный метод позволяет воспроизводить более тонкие проводники за счет меньшей толщины вытравливаемого металла. Толщина используемых в этом методе фоторезистов определяется лишь тем, что толщина рельефа должна быть больше толщины наращиваемой в этом рельефе металлизации (проводников).

Нужно принять во внимание, что при травлении меди по металлорезисту включается в работу гальваническая пара медь-металлорезист (олово-свинец) и подтравливание может занять больше

времени. Но использование интенсивного струйного травления с большим напором струй может нейтрализовать это явление.

Полуаддитивный метод с дифференциальным травлением позволяет воспроизводить еще более тонкие проводники, чем вышеуказанные методы. На нефольгированный диэлектрик осаждают минимальный слой меди, чтобы обеспечить возможность дальнейшей металлизации проводников и отверстий. И так как вытравливается только этот минимальный слой (около 3 мкм), то величина подтравов минимальна (до 2 мкм), что позволяет воспроизводить проводники малой ширины. В этом случае воспроизведение рисунка определяется преимущественно толщиной используемого фоторезиста, толщина которого должна создать рельеф для металлизации, чтобы она не «выплескивалась» за границы трассы. Поэтому и в этом методе вынуждены применять относительно «толстый» фоторезист толщиной около 30 мкм.

Величина П/З для данного метода определяется разрешением фоторезиста и может составлять 0,02/0,02 мм.

Таким образом, выбор метода изготовления существенно сказывается на точности воспроизведения рисунка печатных плат; тентинг-метод при всех его преимуществах не может претендовать на воспроизведение рисунка выше 4-го класса по ГОСТ 237–51; прецизионные печатные платы с проводниками и зазорами около 50 мкм и менее могут быть изготовлены только полуаддитивными методами в сочетании с дифференциальным травлением.

3.7.1. Особенности прессования многослойных плат

Многослойные печатные платы (МПП) изготавливают прессованием диэлектрических фольгированных материалов (с одно- или двусторонним расположением печатных проводников) и прокладочной стеклоткани. Процесс основан на клеящей способности последней при тепловом воздействии. Процесс прессования определяется характером измерения давления и температуры. Качество прессования зависит от множества факторов, важнейшими из которых являются: свойства прокладочной стеклоткани и момент перехода от давления склеивания, когда связующее переводится в клеящее состояние, к давлению отверждения. Прокладочная стеклоткань обеспечивает: прочное сцепление с поверхностью диэлектрических материалов; заполнение мест вытравленного медного

слоя; ликвидацию воздушных включений между слоями за счет растекания смолы; необходимые зазоры между слоями; заданную толщину МПП. Для выполнения этих требований варьируют факторы: подготовленные слои, от которых зависят качество поверхности, толщина проводников и часть поверхности, занимаемая ими. Среди основных факторов, определяющих качество межслойных соединений, следует выделить:

- прокладочную стеклоткань – содержание смолы, степень предварительной полимеризации, растекание смолы, толщина нитей стекловолокна, тип плетения стеклоткани;
- пресс – параллельность плит пресса, постоянство параметров прессования;
- пресс-форму – параллельность, качество поверхности прокладочных листов;
- процесс прессования – температурный режим, характер изменения давления склеивания и давления отверждения;
- отжиг – температура, давление, время. Так как вследствие колебаний молекулярной массы смолы, количества и качества отвердителя и катализатора, а также вследствие прогрессирующей полимеризации при транспортировке и хранении свойства прокладочной стеклоткани непостоянны, то перед каждым использованием новой партии необходимо определение характеристик отверждения (растекания смолы, времени склеивания).

Процесс прессования является одной из важнейших операций изготовления различных видов МПП, которая обеспечивает качество изделий. Монолитность структуры и точность ее элементов обеспечиваются качеством прокладочной стеклоткани, тщательностью подготовки слоев, совершенством технологической оснастки и строгим поддержанием режимов прессования.

Прокладочная стеклоткань, которая поступает на сборку пакетов МПП, должна содержать 45–52 % термореактивной эпоксидной смолы с отвердителем, находящейся в состоянии неполной полимеризации. Процентное содержание смолы, растворителя и летучей фракции проверяется при использовании новой партии и через каждые пять дней применения по методикам, приведенным в ТУ. Одновременно при поступлении нового материала проводятся опытные запрессовки на технологических платах и контроль их качества при термических испытаниях (нагрев до 120 °С и выдержка в течение 1 ч, термоудар при температуре 260 °С в течение 10 с) (рис. 37).

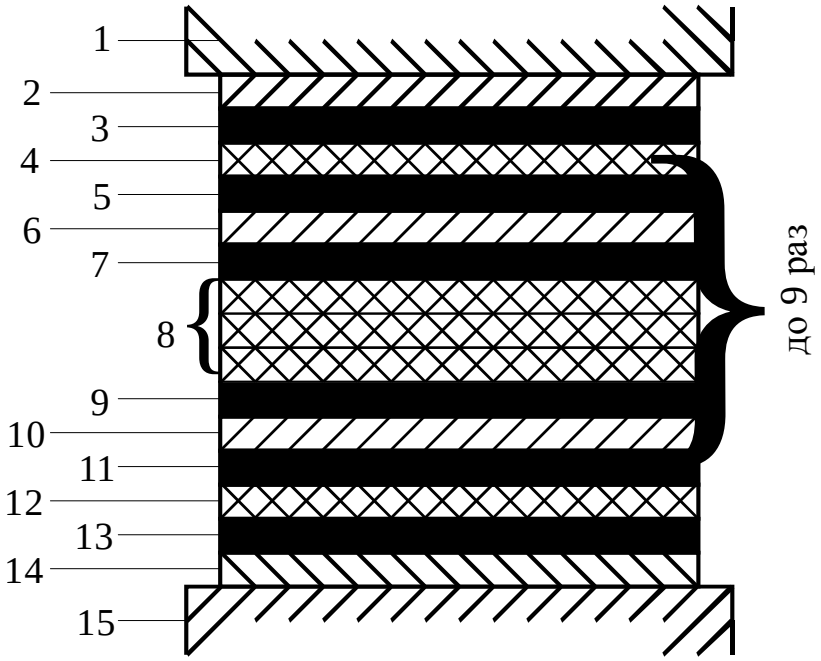


Рис. 37. Схема сборки пакета для прессования МПП:
1, 15 – верхняя и нижняя плиты с обогревом и водяным охлаждением;
2, 14 – верхняя и нижняя плиты пресс-формы; 3, 5, 7, 9, 11, 13 – лист триацетатной пленки; 4, 12 – шесть листов кабельной бумаги;
6, 10 – прокладочный лист из нержавеющей стали;
8 – прессуемые заготовки

Процесс изготовления методом фотолитографии с двух сторон формирует рисунок проводников сразу нескольких идентичных плат (3–8). Далее поверхность меди оксидируют для повышения ее пористости. Образующиеся микронеровности улучшают адгезию смолы, содержащейся в прокладке.

Для изготовления типичного трехслойного полуфабриката набирается пакет, состоящий из платы-детали, помещенной между слоями препрега (прокладки). Наружные слои пакета – листы медной фольги, на каждый ярус пресса помещается 8–10 таких пакетов (между ними кладутся разделительные пластины). Затем пресс запускают, и производится цикл прессования с нагревом и охлаждением, давление составляет 3460–10 350 КПа, температура 173,9–176,7 °С. Продолжительность отверждения 50 мин, для снятия напряжения после окончания отверждения пакет выдерживается при температуре 162,8 °С в течение 4 ч.

После охлаждения платы извлекают из пресса, обрабатывают их края, разрезают на отдельные полуфабрикаты.

Прессование МПП проводят в специальной пресс-форме с плоскопараллельными плитами, обеспечивающей точное совмещение и фиксацию слоев с помощью направляющих штырей, расположенных по углам, и через каждые 100–150 мм по периметру плиты. Для равномерного прогрева прессуемого пакета и выравнивания его по толщине с двух сторон пресс-формы закладываются выравнивающие подушки (см. рис. 37). Температурный режим прессования платы (кривая 1 на рис. 38) предусматривает нагрев пакета до температуры 150–180 °С, удаление летучих компонентов смолы по мере расплавления и смачивания слоев пакета (участок a_1–b_1), переход смолы в состояние желатинизации (b_1–d_1), полимеризацию и затвердевание смолы (участок d_1–l_1), охлаждение пакета до 30–40 °С (участок l_1–e_1). С температурой тесно взаимосвязано давление. При нагреве пакета для обеспечения теплопередачи необходимы предварительное его сжатие и плотное прилегание пресс-формы к плитам пресса. Для этого устанавливают первоначальное давление P_1(100–300 кПа), которое также препятствует удалению летучих компонентов смолы из прокладочной стеклоткани. Высокое давление прессования должно быть создано до начала затвердевания смолы в момент желатинизации (точка c_1 на участке b_1–d_1), когда смола перестает течь и вязкость ее нарастает. Приложение высокого давления (1–4 МПа) до момента желатинизации (точка t_p на рис. 38) приводит к выдавливанию большого количества жидкой смолы и ухудшению сцепления слоев. Приложение давления после момента желатинизации (точка $t_п$ на рис. 38) вызывает дробление смолы, перешедшей в твердое состояние, и образование пустот, также ухудшающих связь между слоями.

Для объективного контроля момента желатинизации измеряют объемное сопротивление изоляции склеивающих прокладок. Анализ показывает, что под воздействием температуры по мере разжижения связывающего вещества объемное сопротивление резко падает (кривая 3 на рис. 38), достигая минимального значения в момент начала желатинизации, а затем по мере отверждения связывающего вещества увеличивается. Регистрация объемного сопротивления проводится датчиком, который изготавливается на технологических полях заготовок из фольги методом травления. При сборке пакета МПП слои располагают таким образом, чтобы электроды были обращены друг к другу, а между ними помещалась склеивающая прокладка. Использование датчиков контроля объемного сопротивления изоляции склеивающих прокладок создает возможности для автоматизации процесса прессования.

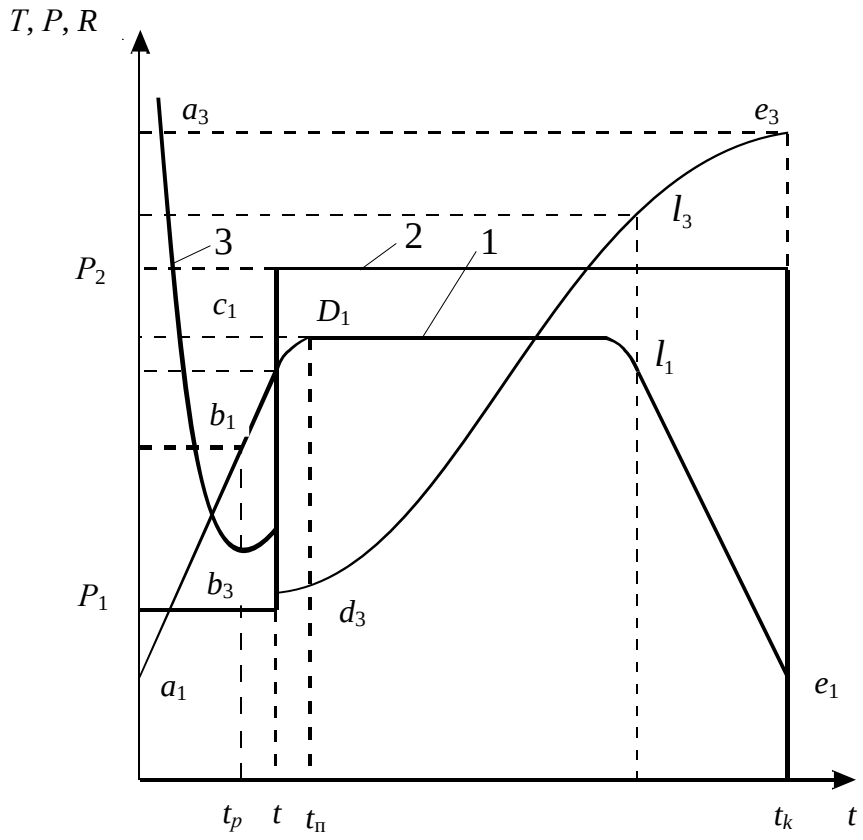


Рис. 38. Характер изменения температуры (1), давления (2) и объемного электрического сопротивления смолы (3) при прессовании МПП

Для прессования МПП применяют специализированные многоярусные гидравлические прессы, оборудованные системами нагрева и охлаждения плит и устройствами для регулирования поддержания технологических режимов. Прессы обеспечивают плоскостность и параллельность плит в пределах 0,1 мм, время нагрева плит до рабочей температуры 20 мин и точность поддержания температуры на их плоскости ±3 °С, давления ±3 %.

Для повышения производительности прессования промышленностью выпускаются автоматические линии. При автоматическом прессовании по заданной программе пресс-формы с обрабатываемыми пакетами МПП с помощью пневматического автооператора перемещаются из позиции загрузки в нагретые плиты гидравлического пресса. Плиты сжимают пакеты в пресс-формах при низком давлении в течение заданного времени, а затем автоматически переключаются на высокое давление. В позицию загрузки устанавливается следующая партия пресс-форм. После выдержки за-

данного таймером времени полимеризации связующей смолы в пакетах МПП горячие и холодные плиты размыкаются, и автооператор перемещает прошедшие стадию полимеризации пакеты из горячих плит пресса в холодные для их остывания при заданном давлении. Одновременно на позицию прессования подается следующая пресс-форма из позиции загрузки, после чего плиты зажимаются и цикл повторяется.

Рассмотрим классификацию методов изготовления МПП по способу получения электрических межслойных соединений (рис. 39).

Для изготовления узлов бытовой радиоэлектронной аппаратуры большей частью используют односторонние платы. Двусторонние ПП применяют для повышения плотности упаковки ЭРЭ и микросхем в функциональных узлах, а также для обеспечения дублированного электрического монтажа. МПП применяют для существенного повышения плотности упаковки аппаратуры, особенно бортовой.

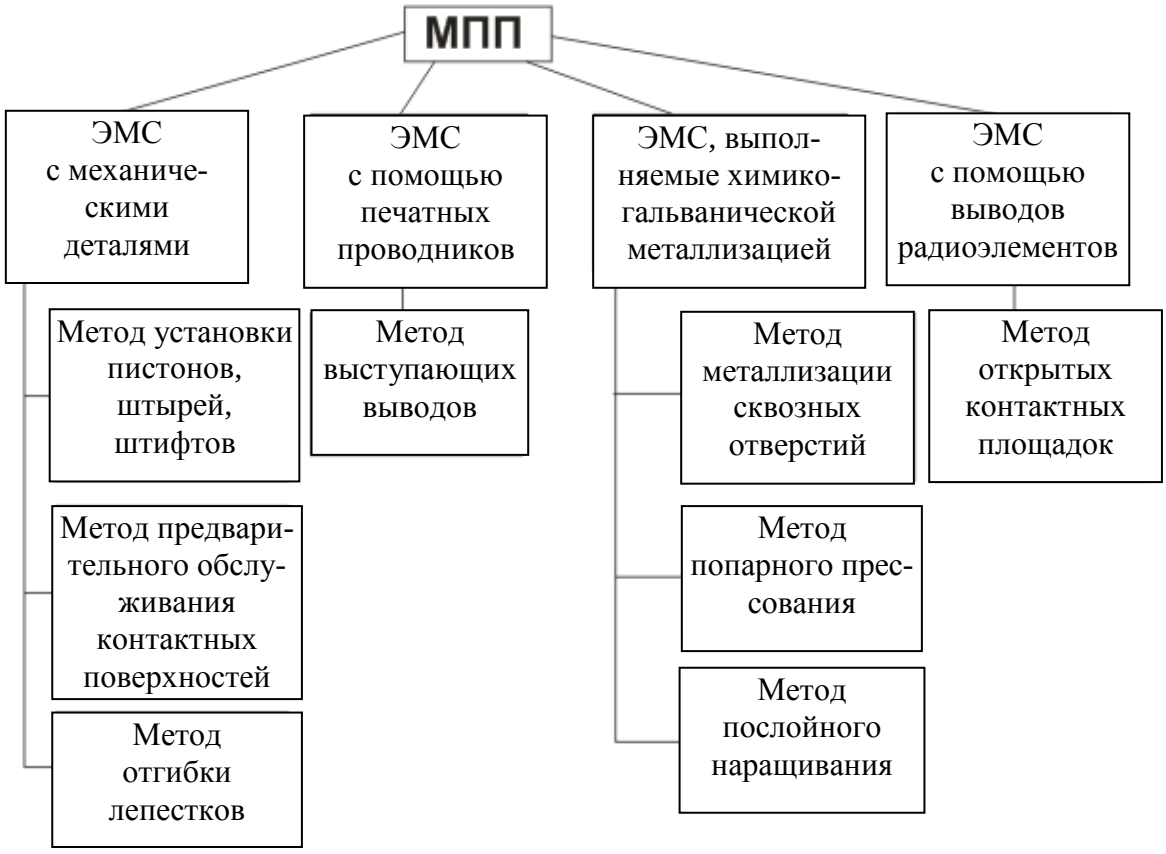


Рис. 39. Классификация методов изготовления МПП

Технология изготовления МПП базируется в основном на тех же процессах получения рисунка печатных проводников и создания электрических межслойных соединений, которые используются в технологии производства обычных ПП. Однако требования к геометрическим допускам и электрическим параметрам МПП часто бывают на порядок выше.

Преимущества МПП заключаются в том, что увеличивается плотность печатного монтажа и уменьшаются размеры платы, повышается надежность и снижается стоимость изделий.

3.7.2. Производство многослойных печатных плат с межслойными соединениями, выполненными механическими деталями

С целью увеличения надежности межслойного соединения в ряде случаев для осуществления электрической связи применяют механические детали в виде штифтов, штырей, пистонов, заклепок и других элементов.

Штифты вставляют в монтажные отверстия и с помощью сварочного аппарата для точечной сварки разогревают до необходимой температуры, в результате чего происходят оплавление припоя (нанесенного на поверхность) и электрическое соединение штифтов с печатными проводниками различных слоев многослойной структуры. Штифты могут быть выполнены из легкоплавкого металла. В этом случае межслойные соединения образуются за счет расплавления штифтов.

Иногда проводят предварительное лужение контактных площадок в каждом слое многослойной структуры, после чего в отверстия МПП устанавливают штыри, пистоны или заклепки, которые затем разогревают. За счет облуживания контактных площадок площадь электрических межслойных соединений увеличивается.

3.7.3. Метод металлизации сквозных отверстий

Этот метод заключается в том, что склеивание (прессование) всех слоев платы осуществляется одновременно с помощью стеклоткани, пропитанной лаком (смолой). Рисунок схемы внутренних слоев МПП выполняется на заготовках фольгированного диэлек-

трика фотохимическим методом. Рисунок наружных слоев выполняется комбинированным позитивным способом.

Межслойные соединения выполняются в виде металлизованных отверстий, обеспечивающих соединение внутренних слоев через торцы контактных площадок, образующихся в отверстиях при сверлении. С целью повышения надежности выполняют операцию подтравливания диэлектрика для увеличения площади контакта на внутренних слоях.

В настоящее время сборку МПП производят в режиме «холодного» и «горячего» прессования. При первом пресс-форма с МПП помещается между холодными плитами пресса, в котором и происходит ее последующий нагрев до необходимой температуры, при втором – плиты пресса предварительно нагревают до 160–180 °С.

При производстве МПП наряду с односторонними можно применять и двусторонний фольгированный диэлектрик. Межслойные соединения во внутренних слоях осуществляют через торцы контактных площадок, образующихся при сверлении отверстий. При этом контактирующая поверхность составляет около 10 % от металлизируемой поверхности отверстия. Применение специального фольгированного диэлектрика, травящегося в смеси серной и плавиковой кислот, позволяет увеличить контактирующую поверхность. Данный раствор почти не взаимодействует с фольгой.

При изготовлении МПП из нетравящегося диэлектрика для повышения надежности межслойных соединений иногда производят гальваническое осаждение меди на торцы контактных площадок МПП. При этом все проводники печатных слоев соединяют технологическими проводниками для образования замкнутых контуров. Для качественной металлизации необходимо, чтобы диаметр отверстий был не менее 1/2 толщины платы. Этом метод является более технологичным по сравнению с подтравливанием диэлектрика, так как не происходит загрязнения агрессивными химическими растворами. Применяют три варианта:

1) на травящемся диэлектрике с получением рисунка наружных слоев способом сеткографии;

2) то же с фотоспособом;

3) с применением гальванического наращивания торцов контактных площадок в отверстиях.

Рассмотрим схему изготовления МПП методом металлизации сквозных отверстий (рис. 40).

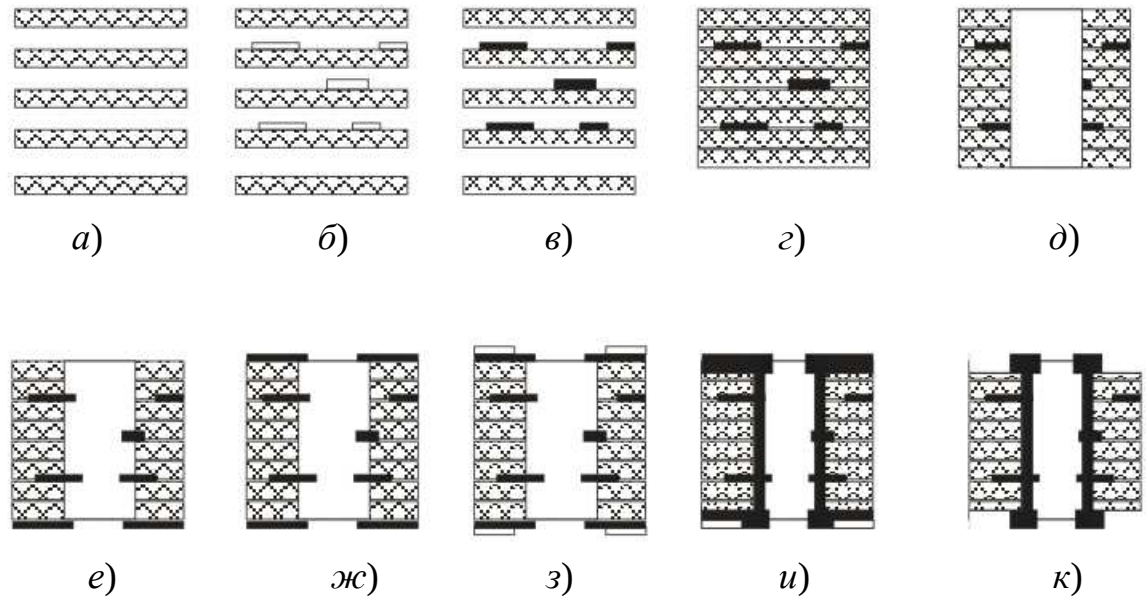


Рис. 40. Метод металлизации сквозных отверстий:

а–б – изготовление заготовок фольгированного материала и стеклоткани;

в–г – получение рисунка схемы внутренних слоев и прессование;

д–з – получение рисунка наружных слоев, сверление отверстий и подтравливание;

и–к – металлизация отверстий и травление меди с пробельных мест

Рассмотрим более подробно все операции изготовления МПП методом металлизации сквозных отверстий (рис. 41).

Входной контроль материалов

Входной контроль заключается в проверке исходного материала на соответствие специально оговоренным условиям, необходимым для производства данного продукта. Такими условиями могут быть различные документы: ГОСТы, ТУ или требования, специально разработанные на предприятии для данного вида продукции. Ниже приведены основные критерии контроля качества:

- постоянство геометрических размеров листов (толщина листа, толщина медного покрытия, длина и ширина листов);
- качество основы и смолы. Смола должна быть равномерно и полностью полимеризована, основа не должна иметь неоднородностей, разрывов. Если проверяется стеклотекстолит, то стеклоткань должна иметь одинаковые, равномерно переплетенные нити;
- качество сцепления основы с медным покрытием;
- наличие в исходном материале инородных частиц;
- контроль качества межслойного материала. Если это препрег, то проверяются тканая основа и способность смолы к полимеризации.

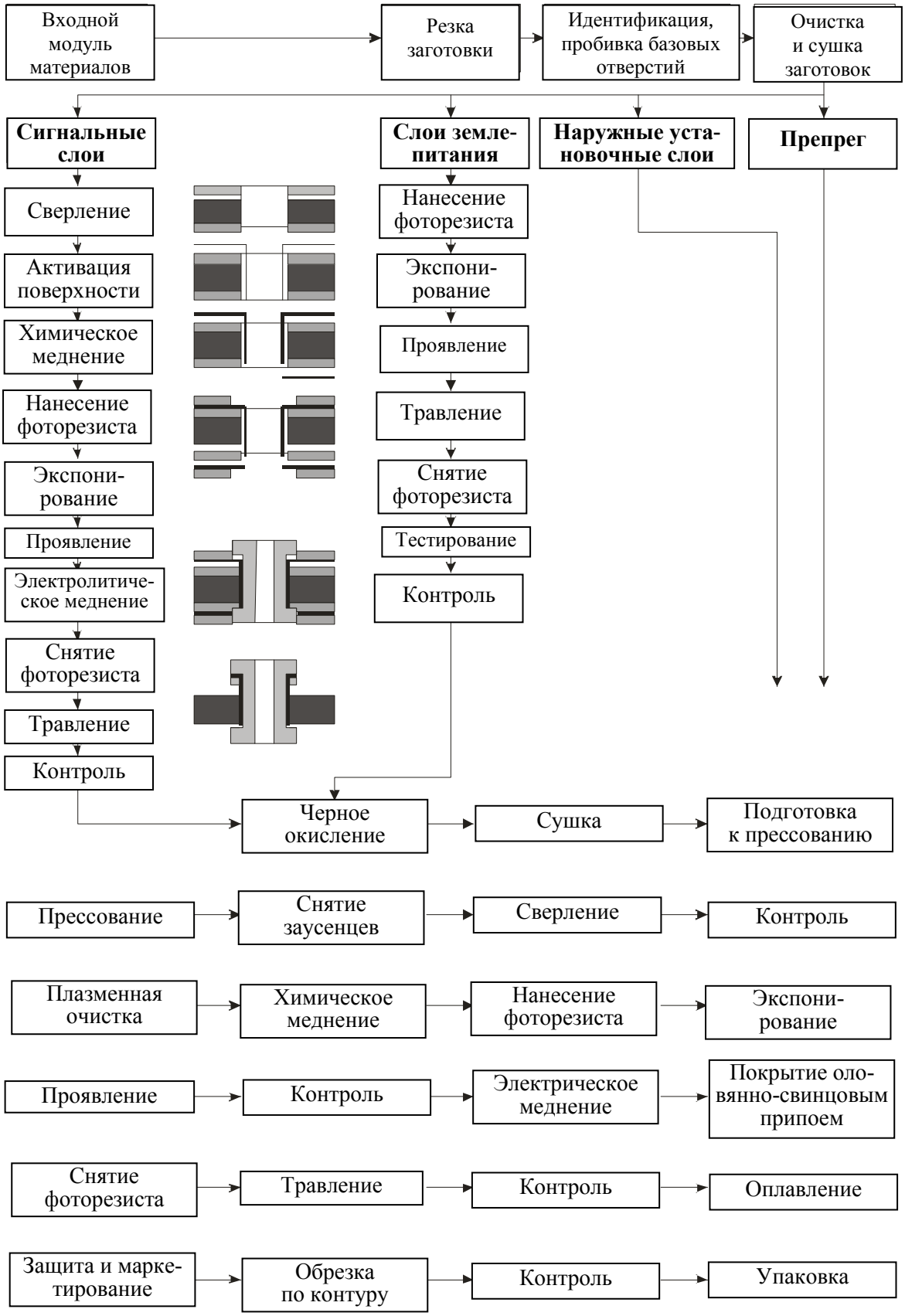


Рис. 41. Этапы ТП изготовления МПП методом металлизации сквозных отверстий

Резка заготовки

Обычно на предприятия листы исходного материала поставляются неразрезанными. Число типоразмеров таких листов ограничено. Поэтому размер будущей печатной платы должен определяться исходя из следующих соображений:

- минимум отходов исходного листа при резке;
- возможности режущего оборудования;
- возможности всего производственного оборудования.

Идентификации

Физические свойства стеклотекстолитовых заготовок по различным направлениям различны. Это связано со свойствами тканой основы. Несоблюдение одинаковой ориентировки заготовок может привести к плохому прилеганию слоев, к короблению платы при сборке, а также к невозможности корректировки коробления в последующем. Для правильной ориентировки заготовок они маркируются. Маркировка состоит из стрелки, указывающей «сильную нить» или машинные направления плетения (основная нить).

Пробивка базовых отверстий

В процессе обработки заготовок и особенно при сборке из них платы необходимо их точное и однозначное крепление в обрабатывающих машинах. Для этого в заготовках пробиваются базовые отверстия. Их количество и расположение на заготовке может быть различным, однако они должны удовлетворять главному требованию – обеспечивать однозначную установку заготовок. Отверстия могут иметь различную форму. Обычно отверстия делают либо круглыми, либо в виде пазов.

Очистка и сушка заготовок

Перед дальнейшим использованием заготовки должны быть очищены и высушены. Заготовки очищаются от окислов, загрязнений, связанных с транспортировкой и хранением, отпечатков пальцев и загрязнений от других источников. Очистка проводится химическими и механическими методами.

Механическим методом очистки является очистка пемзой. Недостаток этого метода – большое количество пемзы, остающейся на заготовке после обработки.

Сушка необходима для удаления остатков влаги после промывки и высушивания заготовок до необходимого уровня влажности.

Сверление

Процесс сверления является довольно сложным с точки зрения настройки и использования сверлильного оборудования. Это связано с тем, что в заготовке требуется просверлить большое количество отверстий (обычное количество – несколько сотен) с заданной точностью за минимальное время.

В настоящее время на производстве применяются многошпиндельные станки с ЧПУ. Число шпинделей может быть различным. Наиболее распространены 4-шпиндельные станки. Существуют также 12-шпиндельные.

Перечислим основные характеристики станков и плат, влияющие на качество сверления:

- точность перемещения шпинделей в рабочей зоне;
- частота вращения шпинделей;
- размер рабочей зоны (определяется размером платы);
- оптимальность перемещений, производимых шпинделями.

Производительность сверлильных станков составляет 400–500 отверстий/мин при скорости перемещения по плате более 1300 мм/мин и частоте вращения шпинделей около 80 000 об./мин.

При сверлении стальными сверлами удается сверлить отверстия диаметром 0,4–0,5 мм. Уменьшение диаметра затруднено ограниченной прочностью сверл.

Управление станками посредством микропроцессорной техники позволяет сделать процесс сверления чрезвычайно гибким.

Активация поверхности

Активация поверхности платы проводится с целью улучшения сцепных свойств поверхности по отношению к последующему.

Химическое меднение

Химическое меднение заготовки имеет целью создать тонкий токопроводящий слой меди в отверстиях. Это позволяет затем путем электролитического меднения отверстий создать в них качественный слой меди необходимой толщины.

Химическое меднение осуществляется путем помещения заготовки в электролизную ванну между анодом и катодом, причем анод изготовляется из меди. Поток ионов меди на пути от анода к катоду встречает препятствие в виде заготовки и оседает на ней.

Нанесение фоторезиста

Формирование токопроводящего рисунка может осуществляться тремя способами:

- травление ненужных участков с уже существующего сплошного медного покрытия;
- наращивание токопроводящего рисунка там, где нужно;
- комбинация первого и второго.

В любом случае избирательность формирования рисунка осуществляется посредством нанесения на заготовку защитного материала.

Существуют два способа формирования защитного рисунка на заготовке:

- сеткографический;
- фотографический.

Сеткографический метод состоит в продавливании защитной пасты через трафарет с помощью ракеля с последующей сушкой или полимеризацией пасты.

Трафарет представляет собой сетчатый лист, некоторые ячейки которого пробиты, а некоторые – так и остались сплошным листом. Таким образом, избирательно пробивая ячейки в листе, на нем можно сформировать рисунок печатной схемы, и при продавливании через трафарет защитная паста попадет на заготовку только через пробитые ячейки. Очевидно, что масштаб трафарета по отношению к рисунку печатной платы должен быть 1:1.

Фотографический метод основан на свойстве некоторых материалов изменять физико-химические свойства под действием электромагнитного излучения, в частности, под действием видимого света. Такие материалы, применяемые в области производства печатных плат, называются фоторезистами. Рассмотрим подробнее этот метод.

На заготовку наносится пленка фоторезиста. Далее следует операция экспонирования.

Экспонирование

Экспонирование может осуществляться несколькими способами:

- экспонирование видимым светом или ультрафиолетовыми лучами через фотошаблон;

- экспонирование растром, созданным электронным пучком, контролируемым ЭВМ;
- экспонирование управляемым лучом лазера.

Традиционным является первый способ. Остановимся на нем.

Для реализации этого способа необходим фотошаблон, представляющий собой прозрачное основание с нанесенным на него непрозрачным рисунком топологии печатной платы. При экспонировании фотошаблон располагается между заготовкой, покрытой фоторезистом, и источником излучения. Это предполагает размещение фотошаблона как непосредственно на заготовке, так и на некотором удалении от нее. После закрепления заготовки и фотошаблона производится экспонирование фоторезиста заготовки. Экспонировать фоторезист можно либо неподвижным источником излучения, либо источником, перемещающимся над заготовкой (сканирующим).

При реализации двух других способов необходимость в фотошаблоне отпадает, так как происходит избирательное воздействие источника излучения на фоторезист.

Проявление

Проэкспонированные заготовки промываются соответствующими реактивами или водой в зависимости от типа применяемого фоторезиста, при этом удаляется непроявленный фоторезист, оставляя незащищенной поверхность заготовки. Эти поверхности можно травить или проводить электролитическое меднение (зависит от технологического процесса).

Электролитическое меднение

Электролитическое меднение необходимо для наращивания меди в области токопроводящих дорожек и отверстий с тем, чтобы при последующем травлении всей заготовки дорожки и отверстия оставались покрытыми медью.

Заготовка помещается в гальваническую ванну с кислым электролитом (сульфат меди), в который добавлены соответствующие очистители и уравнители. Анодом служит медная пластина, в то время как пластина с будущими платами используется как катод. Плотность тока, рассчитанная на основе экспериментов, составляет от 2,35 до 4,65 А/м^2. Дальнейшее увеличение плотности тока ведет к уменьшению скорости потока ионов меди.

Снятие фоторезиста

Перед операцией травления заготовка должна быть очищена от проэкспонированного фоторезиста. Использованный фоторезист удаляется промывкой в соответствующем реактиве или в воде.

Травление

При травлении меди заготовки погружают в ванны с соответствующими реактивами. Заготовки могут также омываться этими реактивами.

Контроль

Этап промежуточного контроля внутренних слоев в большей мере способствует снижению доли брака в готовой продукции. Действительно, оказывается дешевле контролировать качество большого количества внутренних слоев на раннем этапе производства вместо того, чтобы в конце технологической цепочки иметь «черный ящик» и убеждаться в его неработоспособности.

Традиционным методом контроля качества слоев является визуальный осмотр. Но внутренние слои становятся все более и более сложными. Уменьшается толщина печатных проводников, увеличивается их количество. Поэтому визуальный контроль становится неэффективным. Человеку для контроля платы размером 460×610 мм требуется от 30 до 60 мин, но и тогда возможен пропуск 40–50 % дефектов. Это существенно снижает производительность. Системы автоматического оптического контроля (САОК) существенно снижают время контроля и пропуск брака. Стандартные САОК способны проверять платы размером 460×610 мм с толщиной печатного проводника 0,25 мм менее чем за 30 с с пропуском брака 0,5 %. При уменьшении толщины проводников время проверки увеличивается. Так, аналогичная плата с толщиной рисунка 0,075 мм требует для проверки 1 мин или более.

Особенности изготовления слоев «земля-питание»

Понятие слои «земля-питание» включает в себя два типа слоев: слои, в которых размещаются шины питания, и экранирующие слои. Эти слои изготавливаются по упрощенной технологии, без сверления отверстий и соответственно без их металлизации.

Черное оксидирование

При прессовании пакета возникает проблема хорошей адгезии между смолой препрега и медными проводниками. Улучшение ад-

гезии достигается созданием на поверхности меди слоя окисла. При понижении температуры высокотемпературные (черные) окислы меди переходят в низкотемпературные красные или коричневые окислы, эти окислы как раз и повышают адгезионную способность меди. Перед окислением панели могут быть очищены химическим методом или легким протравливанием.

Сушка

Вода, растворители и другие реактивы, адсорбированные внутренними слоями на предыдущих стадиях, должны быть удалены. Это делается для предотвращения образования пузырей и пустот, вызванных испарением упомянутых примесей в процессе прессования и других высокотемпературных стадий, таких как пайка. Слои должны быть просушены при атмосферном давлении и температуре 80–90 °С в течение 2–4 ч или при пониженном давлении при температуре 40–50 °С в течение 1–3 ч. Перед прессованием слои должны быть помещены в сушильный шкаф на 24 ч, в течение которых происходит отпуск слоев. Перемещение слоев вручную должно осуществляться оператором в чистых защитных перчатках или с помощью автоматической системы. Производственные помещения должны удовлетворять требованиям пылезащищенности.

Подготовка к прессованию

Подготовленные слои перед прессованием собираются в пакет.

Точное совмещение слоев осуществляется путем установки слоев на основание, имеющее направляющие штифты, которые расположены в соответствии с пробитыми ранее базовыми отверстиями. Очевидно, базовые отверстия должны быть сделаны во всех листах, составляющих пакет.

Прессование

Прессование проводится при температуре около 180 °С и удельном давлении 10–25 кг см. Для этих целей применяются прессы мощностью 100–150 т. В процессе прессования пакет из отдельных слоев превращается в монолитную плату. Во время прессования смола разжижается и заполняет собой все полости протравленной схемы, вытесняет воздух из межслойного пространства, а затем затвердевает. Смола препрега полностью полимеризуется (С-состояние), скрепляя соседние слои между собой.

Снятие заусенцев

После того, как плата охладится до температуры, близкой к комнатной, ее извлекают из пресса, выдавливают направляющие штифты, а затем обрезают по периметру на ширину 0,5–1,2 см с тем, чтобы удалить заусенцы и образовавшиеся в результате прессования наплывы смолы. Необходимость удалять большее или меньшее количество материала указывает на нежелательные отклонения в технологии производства. Так, например, наплывы смолы шириной около 25 мм указывают на то, что на пакет в процессе прессования оказывалось слишком большое давление. Это приводит к недостатку смолы внутри платы. Наличие пузырьков в заусенцах может указывать на избыток влаги в материале слоев, что приводит к вспучиванию плат при пайке.

Сверление

Отверстия для металлизации сверлятся точно так же, как и для двусторонней платы, за исключением того, что скорость подачи сверла и частота вращения уменьшены. МПП могут быть уложены в стопку для группового сверления. Каждая такая стопка включает в себя верхнюю (входную для сверла) пластину из твердого алюминия и нижнюю пластину из тонкого алюминия, покрытого композиционным материалом с эпоксидным связующим веществом. Пластины служат для улучшения теплоотвода от сверла и для предотвращения появления заусенец в меди.

Контроль

Контроль осуществляется в основном с использованием САОК или визуально.

Плазменная очистка

Платы с просверленными отверстиями подвергаются обработке углеродистым тетрафторидом кислорода в вакуумной камере в присутствии высокочастотных колебаний. В процессе обработки из отверстий удаляются загрязнения и заусенцы, возникшие при сверлении, а также происходит подтравливание меди, которое зависит от времени обработки. Очистка плазмой оставляет пепел, который должен быть удален перед последующим электролитическим меднением.

Основные плюсы процесса в том, что, во-первых, он «сухой» (нет никаких химических реактивов), а во-вторых, нет никаких отходов, за исключением небольшого количества газов и пыли.

Основным недостатком является неоднородность плазмы по всей камере, и поэтому требуется тщательный контроль за условиями процесса.

Химическое меднение

Химическое меднение проводится с целью создания в отверстиях тонкого слоя меди для дальнейшего электролитического меднения. Процесс аналогичен описанному в п. 2.5.7. Но надо иметь в виду, что меднение длинных и тонких отверстий протекает хуже.

Нанесение фоторезиста

В результате выполнения этой и следующих девяти операций металлизируются сквозные отверстия, на внешних сторонах платы формируются облуженные контактные площадки и токопроводящий рисунок.

Процесс нанесения фоторезиста аналогичен процессу, описанному в п. 2.5.8.

Экспонирование

Процесс экспонирования аналогичен процессу, описанному в п. 2.5.9.

Проявление

Процесс проявления аналогичен процессу, описанному в п. 2.5.10.

Контроль

Контролируются качество травления и состояние защитного покрытия. Процесс контроля осуществляется методами, изложенными в п. 2.5.15.

Электролитическое меднение

Процесс электролитического меднения аналогичен процессу, описанному в п. 2.5.11.

Покрытие оловянно-свинцовым припоем

После электролитического меднения платы идут непосредственно на установку для оловянно-свинцовой гальванизации без дополнительной очистки. Оловянно-свинцовая гальванизация очень сходна с медной. Анодом служит пластина оловянно-свинцового сплава, электролитом – раствор фторидов олова и свинца с соответствующей концентрацией. Получаемые толщины лежат обычно в пределах 0,008–0,013 мм, но могут быть и больше в необходимых случаях.

Снятие фоторезиста

Фоторезист удаляется с платы промыванием в соответствующем растворе (см. п. 2.5.13).

Травление

После травления на внешних сторонах остается только медь, покрытая оловянно-свинцовым припоем, а незащищенная медь стравливается.

Контроль

Контролируются состояние внешних сторон платы, качество травления, степень подтравливания меди под оловянно-свинцовым покрытием.

Оплавление

При оплавлении оловянно-свинцовый сплав закрывает края медных дорожек, открывшиеся при травлении. Оплавление обеспечивает также однородность сплава по объему. Оплавление обычно осуществляется путем нагрева платы в инфракрасном излучении.

Защита и маркирование

Как правило, внешние поверхности платы покрывают лаком, защищающим саму плату и токопроводящий рисунок от внешних климатических и других воздействий. Лаком покрывается вся поверхность за исключением участков, куда будут производиться установка компонентов, подключение кабелей и т.д.

Маркировка может наноситься как на саму плату, так и на защитное покрытие. Наименование платы, обозначение элементов и их выводов и другая маркировка наносятся белой или желтой краской.

Обрезка по контуру

На заключительном этапе для обработки краев плат используются различные ножницы ножевого или дискового типа.

Контроль

Заключительный контроль включает в себя:

- визуальную оценку дефектов;
- контроль электрических цепей;
- тест на утечку и непрерывность;
- проверку качества соединения слоев, качество отверстий;
- некоторые специальные параметры (например, для военной техники).

Упаковка

На этом этапе готовые платы укладываются в специальную транспортную тару, в которой платы поставляются потребителям.

3.7.4. Метод попарного прессования

Метод попарного прессования (рис. 42) заключается в том, что на двух заготовках двустороннего фольгированного диэлектрика выполняется рисунок схемы внутренних слоев многослойной платы негативным комбинированным методом. На каждой заготовке между рисунком схемы внутреннего слоя и сплошным слоем фольги наружного слоя выполняются межслойные соединения в виде металлизированных отверстий, после чего полученные заготовки склеиваются (спрессовываются) с помощью стеклоткани, пропитанной лаком.

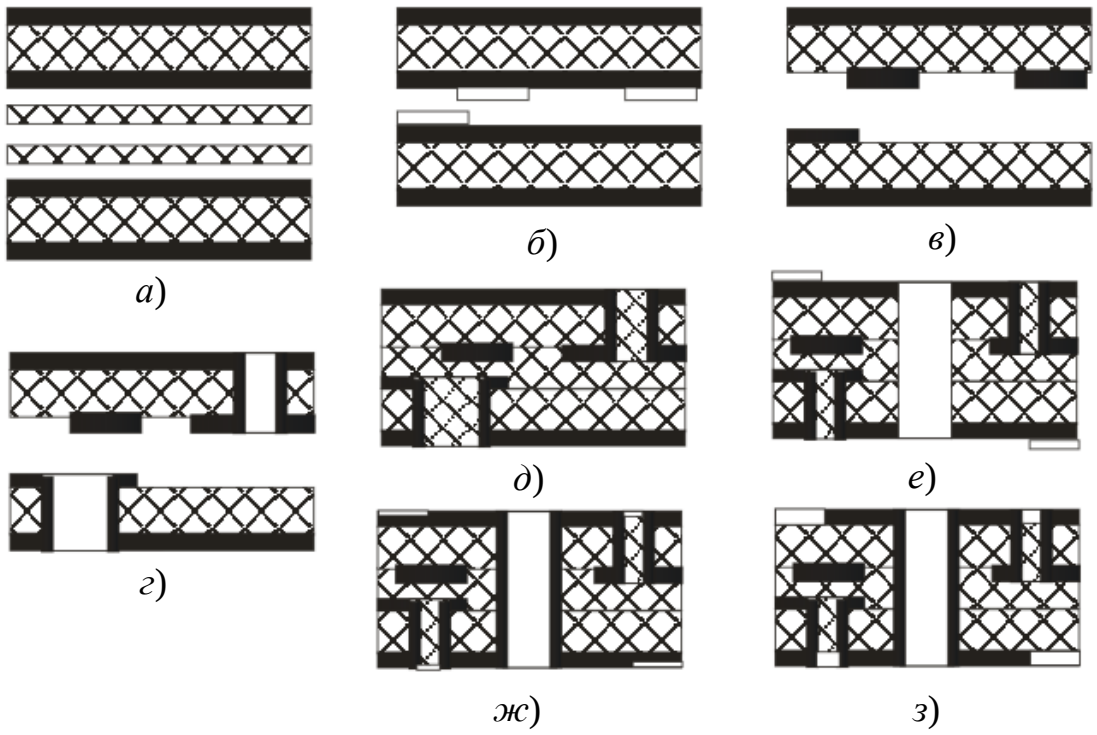


Рис. 42. Стадии изготовления МПП методом попарного прессования:
а – изготовление заготовок фольгированного диэлектрика и стеклоткани; *б–в* – получение рисунка схемы внутренних слоев; *г* – выполнение межслойных соединений между внутренними и внешними слоями; *д* – прессование МПП; *ж–з* – металлизация отверстий и травление меди с пробельных мест

Рисунок схемы на наружных сторонах платы и межслойные соединения в виде металлизированных отверстий между ними выполняются позитивным комбинированным методом.

Метод позволяет изготовлять многослойные печатные платы с количеством слоев не более четырех. Достоинствами его являются высокая надежность и простота изготовления плат. Недостатком метода является малое число слоев.

На платах, изготовленных данным методом, могут устанавливаться навесные элементы как с пленарными выводами, располагаемыми на контактных площадках внахлест, так и с осевыми выводами, устанавливаемыми в металлизированные отверстия.

Схематически процесс изготовления многослойной печатной платы методом попарного прессования можно изобразить следующим образом (рис. 43).

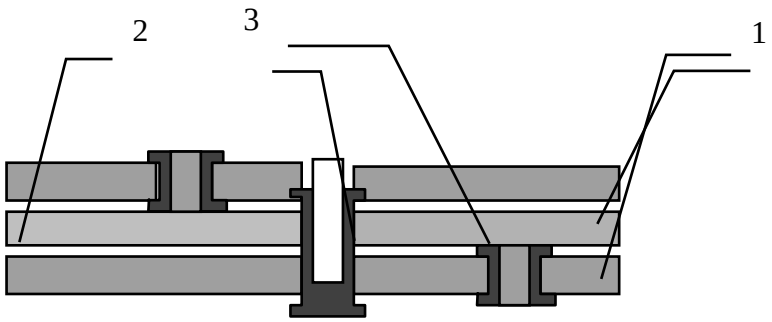


Рис. 43. Печатная плата, изготовленная методом попарного прессования:
1 – двусторонние печатные платы; 2 – диэлектрическая склеивающая прокладка; 3 – межслойные соединения

При изготовлении МПП данным методом после прессования необходимо обеспечить заполнение смолой всех металлизированных отверстий, так как в противном случае при травлении фольги с пробельных мест в наружных слоях может произойти разрушение межслойных соединений.

Недостаток данного метода – низкая производительность, невозможность выполнения большого числа слоев и получения высокой плотности монтажа.

Метод попарного прессования заключается в прессовании двух предварительно изготовленных двусторонних печатных плат 1

(см. рис. 43), переложенных диэлектрическими склеивающими прокладками 2. Межслойные соединения 3 выполняются сначала на каждой из плат по отдельности, а потом – металлизацией сквозных отверстий в спрессованном пакете. Количество слоев в таких платах равно четырем. Метод очень технологичен и надежен, но платы имеют малое количество слоев.

Метод послойного наращивания

Метод послойного наращивания заключается в последовательном нанесении диэлектрика 1 (рис. 44) и соединительных проводников 2. Межслойные соединения осуществляются путем непосредственного контакта соединительных проводников соседних слоев между собой. В качестве диэлектрика используют изоляционный лак или эпоксидную смолу. Метод обладает высокой надежностью и позволяет получить высокую плотность монтажа. Платы содержат до пяти слоев и могут использоваться только для установки поверхностно монтируемых компонентов. Недостатком этого метода является большая трудоемкость, связанная с необходимостью строго выдерживать последовательность операций.

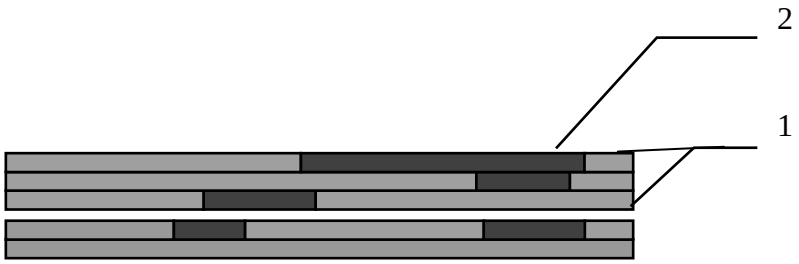


Рис. 44. Печатная плата, изготовленная методом послойного наращивания:
1 – диэлектрик; 2 – соединительные проводники

Метод послойного наращивания заключается в последовательном наклеивании (напрессовании) диэлектрика и выполнении печатного монтажа, повторяющихся по количеству слоев МПП. Для этого на заготовку фольги напрессовывается слой тонкого диэлектрика, перфорированного в местах межслойных соединений. В перфорированные отверстия на поверхность фольги осаждается медь, заполняющая их на толщину диэлектрика. На диэлектрик

осаждается слой меди, на котором выполняется рисунок схемы. Напрессование повторяется по количеству слоев (рис. 45). На последний слой рисунка напрессовывается сплошной слой диэлектрика.

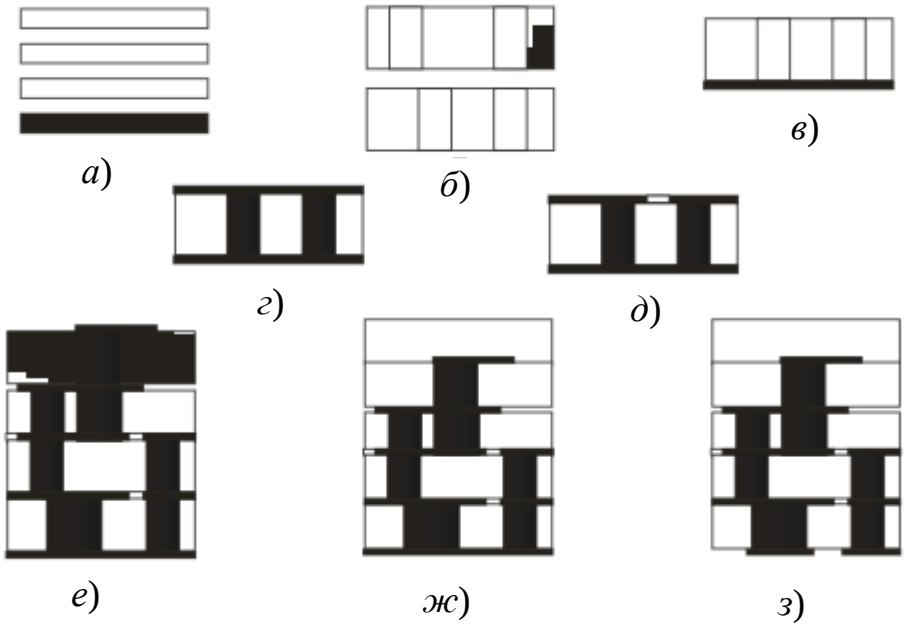


Рис. 45. Метод послойного наращивания:

а–б – изготовление диэлектрика прессованием стеклоткани, нанесение клея на поверхность диэлектрика, перфорирование диэлектрика;

в – напрессование первого слоя перфорированного диэлектрика на фольгу;

г–д – выполнение контактных переходов, химическое и гальваническое меднение поверхности диэлектрика; *е–з* – получение многослойной структуры путем многократного последовательного повторения предыдущих операций

При этом методе связь между слоями осуществляется с помощью целиком выращенных контактных площадок (столбиков меди), в которых могут быть просверлены отверстия для пайки выводов ЭРЭ.

Метод обладает высокой надежностью и обеспечивает наиболее высокую разрешающую способность по сравнению с другими, но трудоемок и длителен из-за невозможности проведения параллельных операций по изготовлению слоев.

При изготовлении МПП методом открытых контактных площадок путем травления фольгированных диэлектриков создаются отдельные слои платы, в которых сверлят отверстия, обеспечивающие доступ к контактным площадкам нижних слоев. Внутренние

соединения в самой плате образуются при пайке выводов элементов к различным слоям платы по открытым частям контактных площадок. При необходимости устанавливают дополнительные перемычки. Для повышения надежности МПП диаметры отверстий в слоях платы должны быть меньше, чем диаметры контактных площадок, над которыми они будут просверлены.

Метод выступающих выводов заключается в прессовании заготовок с нанесенным рисунком и перфорированными окнами, в которых располагаются выводы в виде полосок медной фольги, отгибаемых на наружную сторону готовой платы (рис. 46).

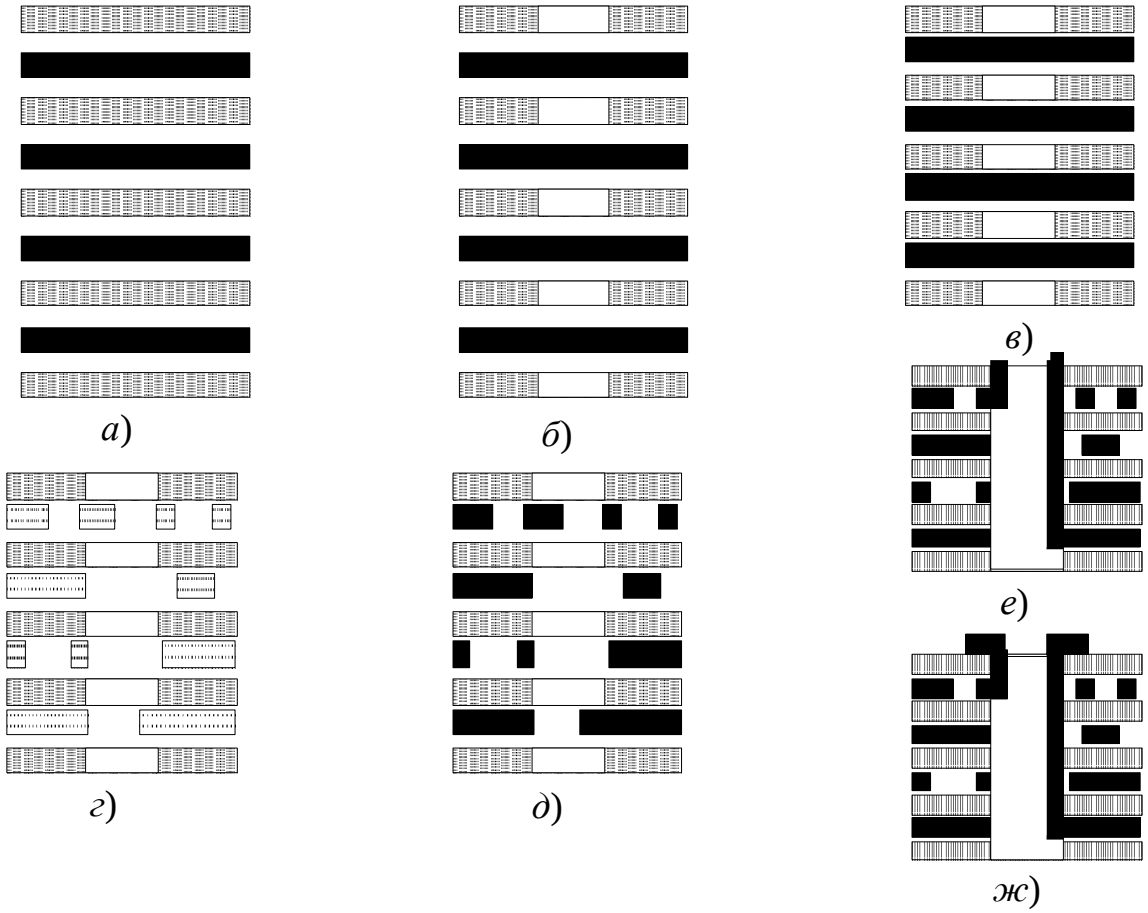


Рис. 46. Метод выступающих выводов:
а – заготовки фольги и стеклоткани; *б* – заготовки фольги и перфорированной стеклоткани; *в* – подготовленный комплект заготовок; *г* – стадии формирования рисунка печатного слоя; *д* – заготовки после травления медного рисунка; *е* – этап прессования слоев платы; *ж* – выводы, выступающие за пределы или в отверстия, отгибаются на колодки и распаиваются

Для изготовления печатных слоев на фольгу напрессовывается слой стеклоткани с перфорированными окнами, размер которых зависит от габаритов устанавливаемых на них элементов, после чего на фольге выполняется рисунок печатного слоя. Склеивание

(прессование) всех слоев платы ведется одновременно. Выводы, выступающие из всех слоев платы, отгибаются на колодки, расположенные на наружной стороне платы.

Межслойные соединения в этом методе отсутствуют, и выводы элементов подсоединяются непосредственно к выводам платы, расположенным на колодках.

Метод открытых контактных площадок заключается в прессовании предварительно просверленных и протравленных слоев фольгированного диэлектрика 1 (рис. 47), переложенных диэлектрическим скрепляющим материалом (обычно это тонкая стеклоткань, пропитанная недополимеризованной эпоксидной смолой). Отверстия просверлены таким образом, что открывают доступ к контактным площадкам 2, расположенным в различных слоях. К ним затем припаиваются выводы компонентов. Такие платы содержат до шести слоев. Технологический метод очень прост в исполнении, но установка компонентов затрудняется глубиной отверстий. Метод пригоден для установки поверхностно монтируемых компонентов.

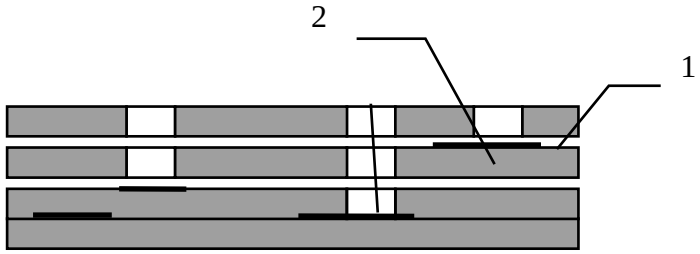


Рис. 47. Печатная плата, изготовленная методом открытых контактных площадок:
1 – фольгированный диэлектрик; 2 – контактные площадки

Для производства МПП применяют четыре основных метода: субтрактивный, субтрактивный с применением сверхтонкой фольги, аддитивный и полуаддитивный. Наиболее надежным при формировании переходов со слоя на слой в МПП является метод с использованием пистонов, штырей и т.д. Однако трудоемкость изготовления велика за счет необходимости индивидуальной обработки каждого отверстия.

Методы химико-гальванической металлизации переходных отверстий находят все большее распространение, обеспечивают наибольшую производительность, малый диаметр отверстий.

Недостаточная надежность переходов из слоя в слой связана прежде всего со сложностью и, в известной мере, непроизводительностью процессов химической металлизации полимерных материа-

лов. Значительная разница в коэффициентах линейного расширения (ТКЛР) материалов подложек и слоя меди приводит при различных температурах обработки к растрескиванию слоев, прежде всего в местах переходных отверстий (рис. 48).

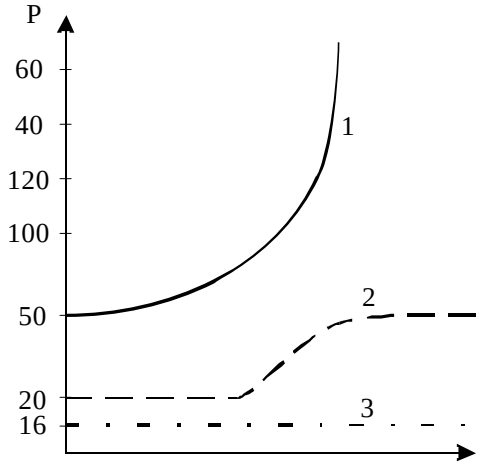


Рис. 48. Зависимость ТКЛР материалов ПП от температуры:
1 – медь + эпоксид; 2 – полиимид; 3 – медь

Надежность переходных отверстий уменьшается с увеличением толщины полимерной платы и с уменьшением диаметра переходного отверстия (заусенцы при сверлении). Метод попарного прессования обеспечивает некоторое увеличение надежности переходных отверстий за счет повышения трудоемкости изготовления и снижения плотности коммутации ввиду отсутствия прямой связи между отдельными слоями и увеличения размеров контактных площадок в местах переходных отверстий. Для увеличения плотности коммутации в субтрактивном методе все чаще используется «тонкая» и «сверхтонкая» (9 и 5 мкм) фольга. Это позволяет резко уменьшить боковое подтравливание линий, равное толщине слоя меди, и создавать ПП с линией 125–250 мкм. Однако производство тонкой фольги еще очень трудоемко и дорого. Поэтому для получения линий в 125–250 мкм используют аддитивные и полуаддитивные ТП. В полуаддитивном процессе слой меди толщиной 2–2,5 мкм осаждается на ничем не покрытую подложку с просверленными отверстиями, а гальваническое усиление ведется избирательно. В аддитивном процессе как предварительная, так и последующая металлизация проводится избирательно, что в принципе исключает подтравливание линий коммутации (хотя не исключает боковое «разрастание» линий, уменьшающее зазоры).

Из-за большой трудоемкости аддитивных ТП они применяются реже. Для избирательного создания рисунка на платах дополнительно наносится либо некаталитическая адгезионная пленка, либо окись титана, а затем – активатор (чаще на основе солей меди или палладия). Плотность коммутации в гораздо большей степени определяется диаметром переходных отверстий и контактных площадок. Необходимо указать, что минимальный диаметр переходных отверстий МПП, изготовленных субтрактивным и аддитивным методами, практически одинаков.

3.8. Перспективные и новые технологии производства печатных плат

3.8.1. Прямая металлизация

Рассмотрим более подробно перспективные и новые конструктивно-технологические направления развития производства ПП: прямую металлизацию, гибкие и гибко-жесткие ПП, а также ПП с микропереходами.

В настоящее время в мире менее 50 % ПП изготовлены с использованием стандартного химического меднения в технологии металлизации сквозных отверстий. Оставшаяся часть плат наиболее вероятно произведена с применением одной из следующих технологий:

1) металлизацией, которая устраняет медь химмеднения и использует только металлы электроосаждения (прямая метализация);

2) химическим меднением (полное формирование меди) в частично аддитивном процессе. Этот процесс разработан для удовлетворения растущего спроса на высокоплотные ПП, применяемые с поверхностным монтажом.

Технология металлизации сквозных отверстий, основанная на стандартном химическом меднении, была выбрана в начале 60-х гг. Метод химического меднения оценивается как наиболее надежный для изготовления ПП. Дополнительные новшества гарантируют, что химическое меднение еще долгое время будет основной технологией.

Бестоковая технология была внедрена, когда регулирующие стандарты, относящиеся к окружающей среде, были менее строги-

ми. В дальнейшем контакты рабочих с опасными веществами (типа формальдегида) были ограничены. Промышленность ищет решение проблем безопасности, поэтому альтернативные методы металлизации будут использоваться рядом производителей.

Прямая металлизация, которая имела умеренный успех в последние пять лет, помогает решить проблемы, свойственные основанным на химическом меднении процессам металлизации, устраняя медь химического меднения полностью. Для обеспечения электрической проводимости, необходимой для последующего электроосаждения на стенки отверстия, используется один из трех способов покрытия: технология, основанная на углероде; процессы, основанные на проводящих полимерах; коллоидные системы, содержащие драгоценный металл.

Каждым из перечисленных методов базисное электропроводное покрытие наносится прежде всего на смолу и стеклянные волокна подложек, но не на медь базового материала. Поскольку на наружных слоях медной фольги и на меди внутренних слоев никакого покрытия не остается, возможность разделения «медь к меди» или пузырения значительно уменьшена. Металлизированное соединение осаждается гальванически, без создания промежуточного тонкого медного слоя (отсюда термин – «прямая металлизация»).

Коллоидные системы, содержащие драгоценный металл, дают самый лучший вариант стандартной металлизации сквозных отверстий. Этот вариант приемлем при применении горизонтального оборудования для производства ПП. С высокой надежностью он может использоваться в стандартном процессе при наличии ресурсов автоматизации. Этот метод особенно привлекателен для производителей, которые хотят использовать прямую металлизацию для части изделий, сохраняя стандартное химическое меднение – для остальных.

3.8.2. Гибкие печатные платы

Гибкие печатные платы (ГПП) могут решать многие специфические проблемы конструирования электронной аппаратуры. Имеющиеся примеры эффективного применения ГПП в разных изделиях являются убедительным подтверждением перспективности реализации связей в электронных узлах с помощью ГПП.

Согласно стандарту ГОСТ 20406–75 «Печатные платы. Термины и определения» ГПП – это «печатная плата, имеющая гибкое

основание». Стандарт IPC-T-50 «Terms and Definition for Printed Boards» определяет ГПП так: «Печатные платы, использующие гибкий базовый материал, без гибкого защитного покрытия или с гибким покрытием». Типы ГПП приведены в табл. 19.

Таблица 19

Типы гибких печатных плат

Односторонние гибкие печатные платы	Платы, содержащие один слой в виде металлических проводников или проводящих (наполненных металлическими частицами) полимеров
Двусторонние гибкие печатные платы	Платы, имеющие два слоя проводников. При этом проводники этих слоев могут соединяться или нет с помощью металлизированных сквозных отверстий. Защитные слои могут формироваться на одной стороне, на обеих сторонах или отсутствовать вообще
Многослойные гибкие печатные платы	Платы имеют три (и более) слоя проводников, соединенных металлизированными переходами, в частности, сквозными металлизированными отверстиями
Гибко-жесткие печатные платы	Платы представляют собой комбинацию жестких и гибких частей единой печатной платы. Соединение гибких и жестких слоев осуществляется прессованием с использованием склеивающих прокладок (препрега). Межслойные соединения осуществляются через металлизированные отверстия разной конструкции (глухие, внутренние или сквозные)
Статические гибкие печатные платы	Гибкость статических печатных плат используется только при операциях сборки
Динамические гибкие печатные платы	Платы делятся на постоянно гибкие (выдерживают миллионы-миллиарды циклов перегибов) и периодически гибкие (выдерживают сотни-тысячи циклов перегибов)

Основные области применения: ГПП-компьютеры, вооружение, космос, автомобили, индустриальная электроника, бытовая техника, медицина, промышленный контроль, измерительная техника.

Мотивы применения ГПП – динамическая гибкость, уменьшение размера конструкции, уменьшение веса изделий, повышение эффективности и уменьшение стоимости сборки, увеличение выхода годных при сборке, увеличение надежности, улучшение электрических свойств и рассеивания тепла, возможность трехмерной конструкции упаковки, совместимость с поверхностным монтажом, упрощение контроля.

Основные характеристики базового материала для ГПП – размерная стабильность, теплоустойчивость, устойчивость к разрыву, приемлемые электрические свойства, гибкость при экстремальных температурах, низкое водопоглощение, химическая стойкость, негорючесть. Наиболее широко применяемые материалы – лавсан и полиимид (табл. 20). Полиимидная пленка – доминирующий материал для изготовления ГПП. Лавсановые пленки (полиэтилентерефталат, ПЕТ) широко используются в бытовой технике, в клавиатурах и калькуляторах.

Таблица 20

Достоинства и недостатки материалов для производства ГПП

Материал	
Полиимидные пленки	Лавсановые пленки
Преимущества	
Отличная гибкость при широком диапазоне температур	Это низкотемпературный термопласт
Хорошие электрические свойства	Очень низкая стоимость
Отличная химстойкость (за исключением горячей концентрированной щелочи)	Хорошая устойчивость к разрыву и распространению разрыва
Очень хорошая устойчивость к разрыву	Очень хорошая гибкость
Определенные типы полиимидов имеют дополнительные преимущества (коэффициент расширения, согласованный с медью, уменьшенное напряжение в ламинатах)	Хорошая химстойкость
Полиимид можно химически травить	Низкое влагопоглощение
Рабочая температура 200–300 °С	Хороший баланс электрических характеристик
	Рабочий диапазон температур от +60 до +105 °С
Недостатки	
Высокое водопоглощение (до 3 % по весу)	Ограниченность к пайке (имеет низкую точку плавления)
Относительно высокая стоимость	Нельзя использовать при очень низких температурах (становится хрупким)
Несмотря на собственную высокую рабочую температуру, их высокотемпературные свойства ограничивают адгезивы	Недостаточная размерная стабильность (применяют термостабилизацию)

Защитные слои – аналог паяльной маски. Защитные слои увеличивают устойчивость к перегибам. Защитные покрытия – акрилаты, полиуретаны, акрилэпоксиды. Жидкие отверждаются с помощью ультрафиолетовых лучей или теплом. Фоточувствительные защитные слои – пленки и жидкие для сеткографии и фотохимического формирования рисунка. Достигается высокая прецизионность рисунка. Соединительные пленки – пленки с адгезивом, защищаемые снимаемой пленкой, применяются для изготовления многослойных ГПП и гибко-жестких плат.

При конструировании многослойных ГПП используются двусторонние и односторонние фольгированные гибкие материалы, на которых выполняется требуемый рисунок проводников отдельных слоев, и соединительные пленки (препрег) для склеивания слоев в многослойную структуру. Поверхность платы защищается покровной полиимидной пленкой с адгезивом (табл. 21).

Таблица 21

Характеристики гибких и гибко-жестких печатных плат

Характеристики	1-й этап	2-й этап	3-й этап
1	2	3	4
Число слоев	от 1 до 8	от 9 до 12	более 12
Допуск толщины	±10 %	±8 %	ниже 8 %
Ширина проводников (мкм) при 18 мкм медной фольге	250 и выше	100	50
Ширина проводников (мкм) при 35 мкм медной фольге	350 и выше	200	от 100 до 125
Допуск ширины проводников	±20 %	±35 мкм	±12,5 мкм
Самый маленький размер отверстия при механическом сверлении, мкм	300	250	200
Самый маленький размер отверстия при лазерном сверлении, мкм	250	100	50
Отношение толщины платы к диаметру сквозного отверстия, (Н), *d*	4:1 или меньше	до 8:1	выше 8:1
Отношение толщины платы к диаметру глухого микроперехода, (Н), *d*	–	0,5:1 макс	0,75:1 макс
Шаг выводов поверхностного монтажа, мм	более чем 0,5	от 0,35 до 0,5	менее 0,35
Допуск волнового сопротивления	±15 %	±10 %	±5 %

Окончание табл. 21

1	2	3	4
Минимальный размер внутренней контактной площадки, мкм	800	650	500
Минимальный размер наружной контактной площадки, мкм	1000	800	650
Минимальный зазор паяльной маски, мкм	200	100	50
Минимальная перемычка паяльной маски, мкм	200	150	–
Минимальная перемычка покровной пленки, мкм	300	250	–

Конструкция гибко-жестких плат может основываться на двуслойных или многослойных жестких ПП. Гибкие части могут содержать несколько однослойных или двуслойных ГПП. При конструировании гибко-жестких плат необходимо:

- избегать расположения сквозных металлизированных отверстий на изгибающихся поверхностях;
- трассировать проводники под углом 90° к направлению изгиба;
- трассировать проводники на одиночных слоях в области изгибов;
- делать дугу изгиба большой для увеличения срока службы динамических ГПП;
- проектировать с расположением медных слоев в нейтральной части ГПП;
- обеспечивать максимально допустимый радиус перегибов;
- обеспечивать плазменное травление отверстий.

Монтаж компонентов с использованием гибко-жестких ПП рекомендуется осуществлять на жестких частях.

Методы изготовления однослойных ГПП:

- предварительное штампование отверстий перед фольгированием;
- химическое травление полиимида;
- механическое стачивание;
- лазерная обработка;
- плазменное травление отверстий.

При изготовлении двуслойных ГПП рекомендуется тентинг-метод (металлизация панели, печать и травление). При изготовлении многослойных ГПП можно использовать следующие методы: стандартный процесс изготовления МПП, послойное наращивание с металлизацией переходов, соединение с помощью анизотропных материалов, спрессовывание фольгированных подложек с программированными переходами.

Гибко-жесткие ПП – наиболее сложные соединительные структуры современной электронной аппаратуры. Их изготовление требует элементов обеих технологий – технологии жестких и технологии гибких ПП. Жесткие платы спрессовываются с гибкими, и осуществляются соответствующие сквозные межслойные соединения. Простейшая гибко-жесткая плата – один жесткий и один гибкий слой.

Сложные гибко-жесткие платы могут содержать более десяти гибких соединительных наборов между жесткими внешними слоями. Гибкие соединительные наборы составляют одно- и двуслойные ГПП. Гибко-жесткие платы сложны в производстве. Они используют большой набор разнородных материалов разной природы и размерной стабильности, а также разной степени надежности металлизации. Ключевые операции производства гибко-жестких плат:

- нарезка гибких и жестких ламинатов в размер групповых заготовок и маркировка;
- создание базовых отверстий в заготовках;
- создание на гибких слоях рисунка проводников (фотохимия и травление), в некоторых соединительных областях могут формироваться межслойные металлизированные переходы;
- припрессовывание защитных слоев на травленый рисунок;
- предварительная фрезеровка жестких ламинатов для удаления ненужных частей после изготовления (полное выфрезеровывание или фрезерование на определенную глубину, или скрайбирование материала);
- нарезка соединительных прокладок с удалением определенных областей для предохранения гибких областей от склеивания между собой и с жесткими частями;
- спрессовывание защищенных схемных слоев и жестких внешних слоев с помощью вырезанных гибких соединительных листов, гибко-жесткая панель сверлится с использованием той же системы базирования;

- очистка отверстий с помощью плазменного травления;
- химическая и электрохимическая металлизация;
- формирование негативного изображения на наружных слоях, электрохимическая металлизация окон в рисунке – медь, затем олово-свинец;
- удаление фоторезиста и травление меди;
- выфрезеровывание гибко-жестких плат из заготовки, лишние жесткие части механически удаляются;
- припрессовывание защитных слоев.

К гибко-жестким ПП предъявляются серьезные требования – они должны выдерживать условия термоциклирования и термоудары, так как используется много адгезивов с высоким коэффициентом теплового расширения. Первое решение проблемы – применение безадгезивных материалов. Второе решение – применение новых или улучшенных конструкций, например, усиление металлизации сквозных отверстий или уменьшение числа адгезионных слоев в жесткой части плат.

Необходимость адаптации имеющегося оборудования и оснастки для изготовления гибко-жестких плат определяет, прежде всего, малая толщина применяемых фольгированных диэлектриков для гибких частей плат и гибких слоев МПП. Для обработки тонких фольгированных диэлектриков на струйных конвейерных линиях в необходимых случаях требуется произвести изменения системы валков конвейера для исключения прогиба материала между валками под воздействием струй рабочего раствора. Прогиб приводит к подъему передней торцевой части заготовки и возможности ухода заготовки с плоскости движения, ее деформации или поломки.

В связи с этим целесообразно выбирать установки с достаточно частым размещением пар (верхнего и нижнего) конвейерных валков. И совершенно неприменима обработка на установках, не имеющих верхних валков. Уменьшение шага между парами валков на имеющихся установках произвести очень сложно, а чаще – невозможно. Рекомендуемым решением задачи обработки гибких слоев на имеющихся установках является применение различного рода оснастки, «закрепляющей» заготовку.

При наличии глухих отверстий в конструкции плат их очистку необходимо производить в плазмохимической установке. Вследствие нагрева и воздействия потока ионов газов в таком случае про-

исходит сильная деформация заготовки (скручивание в свиток). Для устранения скручивания необходимо применять специальные приспособления. Качественную металлизацию гибких плат можно произвести только при взаимном перемещении платы и электролита. В существующих линиях для металлизации такое перемещение осуществляется качанием плат в ванне с электролитом в направлении, перпендикулярном к плоскости плат. При этом от давления электролита на поверхность плат они стремятся прогнуться. Для предотвращения изгиба, особенно в случае большой площади заготовки, целесообразно применять закрепление гибкой заготовки в двусторонних рамках. Закрепление должно быть достаточно прочным, чтобы заготовку не вырвало из рамки.

Сверление гибко-жестких МПП производится обычными приемами, так как наличие краевых участков окон под гибкие участки делает заготовку достаточно жесткой и прочной для сверления типовым методом с базировкой на отверстия, на которые позиционируются все слои при прессовании гибко-жестких МПП.

Нанесение пленочной паяльной маски на жесткие участки гибко-жестких МПП не представляет трудностей. Подготовку под нанесение маски целесообразно производить на пемзоструйной установке для обеспечения хорошей адгезии. Так как к этому моменту гибкие участки представляют собой сплошную мембрану в окнах, отмывку от остатков пемзового порошка можно произвести достаточно эффективно и полно.

Нанесение жидкой паяльной маски имеет сложности, в ряде конструкций осуществить эго невозможно из-за наличия углубления окон. Лужение мест, подлежащих пайке (после нанесения паяльной маски), производимое на современных установках с выравниванием и удалением излишнего припоя с помощью воздушных ножей, требует жесткого закрепления заготовок гибких плат. Для закрепления гибких плат в виде фиксирующих рамок необходимо применять специальные приспособления. Лужение гибко-жестких МПП производится в специальном зажимном приспособлении.

Если на гибко-жестких МПП нанесена паяльная маска, стойкая в растворах химического никелирования и иммерсионного золочения, то до вырезки окон нанесение подслоя химникеля (5 мкм) и иммерсионного золота (0,15–0,2 мкм) возможно. Закрепление гибко-жестких МПП производится в подвески, основной задачей которых, помимо обеспечения качества, является достижение минимальных потерь золотосодержащего раствора.

Обработка гибких плат по контуру производится наиболее приемлемым для масштабов производства способом:

- штамповкой;
- лазерной вырезкой на станке с программным управлением;
- фрезеровкой с помещением между накладками;
- вырезанием ножницами.

Специфичной операцией при изготовлении гибких плат и гибко-жестких МПП является напрессовка покровной пленки. До напрессовки в заготовке пленки для гибких плат необходимо сформировать (пробивкой на штампе) базовые отверстия и отверстия для мест пайки. В заготовках для гибких слоев гибко-жестких МПП должны быть вырезаны окна для жестких участков МПП.

При напрессовке покровной пленки необходимо обеспечить плотное прилегание пленки в промежутках между проводниками, для чего между триацетатной пленкой и прокладочным листом целесообразно помещать лист тонкой резины толщиной примерно 0,5 мм. Важно обратить внимание на то, что из-за уникального характера материалов полное использование выгод конструкции гибко-жестких плат определяющим образом зависит от выбора технологии изготовления. Характеристики гибких и гибко-жестких ПП, которые должны быть реализованы в России, приведены в табл. 21.

3.8.3. Полиимидные платы

Одним из перспективных и практически реализованных конструктивно-технологических вариантов исполнения внутриблочных соединений является применение многослойной гибкой полиимидной платы. Гибкие платы, несомненно, являются одним из перспективнейших направлений в области техники монтажа. Способность неоднократно изгибаться и свертываться в трех плоскостях, малые толщины и соответственно масса, ударопрочность – вот далеко не полный перечень преимуществ применения ГП. Особенно очевиден эффект применения многоуровневых ГП в качестве межъячеестой и межблочной коммутации взамен навесных проводников, навесных ремней, круглых и плоских кабелей.

ГП изготавливают по субтрактивной или полуаддитивной технологии. В США и Японии 80–90 % ГП изготавливаются пока односторонними по субтрактивной технологии травления пленок

меди толщиной 35 мкм, при этом за счет подтравов ширина линий и зазоров более 250 мкм. При необходимости использования двусторонних ГП с переходами их сверлят и наносят медь в отверстия с использованием метода химического или электрохимического осаждения; иногда отверстия полностью заполняют оловянным припоем.

В настоящее время ГП имеют несколько тенденций, определенных дальнейшим повышением требований к плотности элементов и компонентов в условиях микроэлектроники:

1) использование тонкопленочной технологии для создания коммутационных элементов гибких плат, включая фотолитографию и вакуумное осаждение;

2) комбинированное применение гибких и жестких плат;

3) использование в качестве жестких плат металлических оснований, покрытых слоем диэлектрика – конструктивного материала, который наиболее эффективно обеспечивает жесткость конструкции и теплоотвод от компонентов РЭА.

В качестве материала для гибкой платы может использоваться полиимидная пленка (Kapton A, Kapton V фирма Du point-США; ПМ-1, Марка А – СССР), она обладает высокой прочностью на растяжение, хорошими изоляционными свойствами, химической стойкостью, несгораемостью. Кроме того, ей присущ ряд свойств, необходимых в ГП, связанных с вакуумным осаждением пленок и фототравлением. Это – прежде всего наиболее высокая среди полимеров температурная устойчивость (пленка не теряет гибкости при температуре жидкого азота и в то же время выдерживает 673 °К), отсутствие существенных газовыделений в вакууме до температуры 473–523 °К, высокая радиационная устойчивость и способность к однородному травлению в сильных щелочах. К недостаткам можно отнести несколько повышенное водопоглощение, относительно высокую стоимость, которая, однако, не столь существенна для РЭС ввиду малой массы потребляемого материала. Изготовление двухуровневой коммутации происходит на основе полиимидной пленки – после двустороннего фототравления за один цикл фотолитографии формируются отверстия диаметров 20–30 мкм на пленке толщиной 25 мкм и диаметром 50–70 мкм на пленке 50 мкм. Вакуумная металлизация позволяет достигнуть большой равномерности по толщине, улучшить воспроизводимость и адгезию. После избирательного усиления металлизации слоем гальванической меди с последующей защитой коррозийно-стойким сплавом типа олово-висмут

двусторонняя коммутация обладает исключительно высокой надежностью мест пересечения и мест переходов. Следует отметить, что такая технология изготовления двухуровневой коммутации является естественным продолжением (развитием) как технологии МПП, так и тонкопленочной технологии: для снижения вероятности появления обрывов в металлизированных отверстиях и увеличения разрешающей способности рисунка в МПП всегда рекомендуется снижать толщину диэлектрика и металлических шин, переходить к аддитивным способам получения рисунка; для снижения вероятности появления коротких замыканий в тонкопленочных структурах необходимо, наоборот, увеличивать толщину диэлектрика. Основной круг вопросов, определяющих технологию изготовления и качество двухуровневой коммутации на полиамидной пленке:

1) создание предварительной металлизации (вакуумным способом), обеспечивающей необходимую силу сцепления слоев коммутации и основания из полиимида;

2) совмещение рисунка коммутации (на обоих сторонах подложки) с переходными отверстиями с учетом усадки, присущей всем полимерным материалам;

3) равномерное травление материала основания (полиимида) для получения необходимой формы переходных отверстий и окон под балочные выводы;

4) формирование рисунка схемы на гибридной подложке;

5) избирательное гальваническое наращивание в месте переходного отверстия между коммутационными элементами на разных уровнях и создание условий для присоединения выводов от кристаллов БИС к контактным площадкам платы.

3.8.4. Платы алюминиевые с анодированием

Функции несущей конструкции теплоотвода и подложки большой гибридной ИМС объединены и выполняются металлической (алюминиевой) платой, покрытой слоем анодного окисла, а функции коммутационной печатной платы выполняет система гибких полиамидных пленок с нанесенными на них методом тонкопленочной технологии проводящими дорожками. На плате из анодированного алюминия создан один слой проводников и резисторов, два или более слоев в коммутации могут быть созданы на полиимидной пленке.

Коммутационные переходы с одной стороны гибкой платы на другую осуществляются системой металлизированных отверстий. Гибкие коммутационные платы присоединяются к анодированной алюминиевой подложке методом групповой пайки, для чего на подложке сформированы контактные площадки, покрытые припоем. На полиимидных гибких платах в соответствии контактным площадкам имеются переходные металлизированные отверстия. При подогреве системы «подложка – гибкие платы» в условиях вакуума (вакуумная пайка) припой поднимается по переходным отверстиям и, застывая, образует прочные коммутационные соединения и одновременно механическое крепление. Для изоляции между гибкими коммутационными платами используют прокладки из полиамидной пленки с системой отверстий в местах межслойных переходов. По сравнению с РЭА на ПП достигается 15–20-кратное уменьшение габаритов и массы. Существует оборудование для производства плат размером 78×95 мм с разрешающей способностью 5 линий/мм и с шагом внутренних контактных площадок 0,3–0,5 мм. Мощность рассеивания – порядка 30 Вт.

3.8.5. Керамические платы

Керамические многослойные платы получают путем спекания слоев из пластифицированной (сырой) керамической ленты (приблизительно 10 слоев) с нанесенными на них проводниками из молибденовой пасты (как и при производстве оснований керамических корпусов) и с впрессованными металлическими контактными переходами, расположение которых фиксировано/стандартное как для верхнего слоя, на который нанесены контактные площадки для полупроводниковых БИС, так и для промежуточных слоев. На нижний слой нанесены контактные площадки под внешние выводы.

Керамика обжигается, получают несколько слоев керамики с металлизированными отверстиями. Керамика неплохо отводит тепло. При этом повышается процент выхода годных, минимизируются паразитные связи, но ограничены размеры (100×120 мм^2), довольно сложная технология. Данная технология широко используется в Японии.

Ширина линий проводников и диаметр запаленных под давлением молибденовой пастой сквозных отверстий – 120 мкм. Пробивка отверстий в слоях необожженной керамики, выполнение ри-

сунка трафаретов, контроль отдельных слоев подложки и проверка всех электрических цепей подложки проводятся с использованием САПРа. Штыри к нижней поверхности подложки припаиваются твердым припоем. Одновременно к подложке также твердым припоем прикрепляется металлический фланец. Установка кристаллов осуществляется с использованием свинцово-оловянного припоя.

Керамические многоуровневые платы изготавливают по толстопленочной технологии. Она более проста, но имеет ограниченные возможности. Разработано автоматизированное оборудование для нанесения пасты.

3.8.6. Металлические платы

Замена монолитной однородной платы (подложки) ИМС многослойной керамической коммутационной платой (для толстопленочных ИМС) и использование в качестве плат металлических пластин, покрытых слоем диэлектрика, с закрепленными на них несколькими коммутационными слоями, выполненными на гибком диэлектрическом носителе по тонкопленочной технологии*. Межслойный диэлектрик может быть выполнен из органических материалов (термопластов), обеспечивая формирование монолитной структуры чередующихся слоев тонкопленочной металлической разводки и слоев диэлектрика.

Металлическую плату на основе алюминия можно изготовить следующим образом. Слой алюминия оксидируют, наносят новый слой, на котором производят формирование рисунка слоя коммутации не фототравлением, а избирательным сквозным анодированием второго рода. Затем выполняется еще одно анодное окисление первого рода в местах, где должен проходить второй слой коммутации. Нанесение второго слоя коммутации (чаще всего алюминия) и формирование его рисунка проводятся обычным способом.

К сожалению, необходимо проверять качество выполнения операции «сквозного» анодирования вследствие весьма большой вероятности сохранения в отдельных местах шунтирующих включений неокисленного алюминия, а также повышенной паразитной емкости между слоями.

* Позволяет значительно повысить плотность монтажа.

Альтернативой алюминиевым платам являются стальные платы. На стальной пластине по толстопленочной технологии изготавливают слои платы. Сталь предварительно глазируют (паста, стекло). Большая теплопроводность позволяет применять их для мощных схем.

Фирма «АФИГ» (Финляндия) предлагает новую технологию производства гибридных печатных плат. Эти многослойные платы для ЭВМ в буквальном смысле печатаются с рулона на рулон – принципиально новое решение технологии. На тончайшую гибкую пленку наносится филигранный серебряный узор (проводники, сопротивления). Все это тут же покрывается слоем изоляции, причем только в тех местах, где это необходимо. Таким образом получается невесомая, толщиной в доли миллиметра плата.

Новый материал для подложек ПП изготавливают на основе эпоксидной смолы и пористого кордиерита ($2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$) в различных комбинациях, имеющий ТК расширения, близкий к ТК расширения кремниевого кристалла, названный CERACOM-001. Структура подложки ПП на основе CERACOM состоит из композитной подложки (пористая керамика+смола), на обе стороны которой последовательно наносятся закрепляющие слои из стеклянной крошки, пропитанной эпоксидной смолой, и проводящие слои из медной фольги. Достоинства CERACOM: технологичность, механическая прочность, малая масса, управляемость коэффициентом теплопроводности и ТК расширения, возможность использования на ВЧ, высокая влагостойкость, стабильность размеров и надежность металлизированных отверстий.

В качестве исходного материала ПП или МПП применяют изоляционные подложки с нанесенными слоями проводника (алюминий с графитом). Равномерно сверлят отверстия в виде прямоугольной сетки (диаметр – 0,762 мм). Каждая подложка обрабатывается перемещающейся головкой с электроэрозионными электродами. В результате обработки, осуществляемой по определенной программе, часть проводящего слоя удаляется с обеих сторон подложки таким образом, чтобы между определенными отверстиями на подложке были образованы проводящие пути. Подложки складывают в пакет с разделительными прокладками, имеющими контактные переходы, и получают коммутационную плату.

Оригинальный способ создания ПП предполагает, что проводники формируются из проводящих полимеров методами толсто-

пленочной технологии. ПП может содержать толстопленочные резисторы и другие элементы, наносимые методами сеткографии. Для обеспечения высокой адгезии полимерных материалов поверхности ПП придается шероховатость химическим травлением, применением литьевых форм с шероховатостями, либо электроэрозионной обработкой или пескоструйной. После нанесения пастообразных проводников в них монтируют выводы ЭРЭ и подвергают термической обработке при 150 °С. Проводники затвердевают и создают высококачественные электрические и механические соединения с выводами навесных ЭРЭ. Исключается пайка.

Существует еще один способ, при котором исключается большое число технологических операций, используемых при обычной технологии, а также операций, связанных с химическими и фотографическими процессами. В одном варианте основание формируется из полимера или другого диэлектрика методом, например, литьевого прессования. На основании предусматриваются отверстия (фигурные выемки у этих отверстий и желобки между отверстиями). После очистки основание подвергается термообработке для снятия механических напряжений и придания плоскостности в заданном приспособлении. Затем вся поверхность основания, включая сквозные отверстия, покрывается слоем меди методом напыления в вакууме. Удаление медного покрытия с пробельных мест производится механической обработкой, например, шлифованием. В результате медь остается в желобках. При необходимости защиты поверхности диэлектрика от посторонних включений вся поверхность покрывается паяльной маской с использованием, например, трафаретного способа. В качестве материала для основания могут быть использованы полисульфон, полиэфирилид, эпоксид и др.

Многослойные керамические коммутационные платы в качестве подложки используют керамику с температурой спекания 1500–1650 °С. Следствием этого является использование для металлизации тугоплавких металлов (вольфрам, молибден). Керамика имеет большую диэлектрическую проницаемость – 9,0, а металлизация – большое удельное сопротивление. Поэтому изделия на основе таких МККП имеют ограничения по скорости передачи сигналов.

Предложена керамика с температурой спекания меньше 1000 °С. В качестве проводников используют пасты на основе золота, серебра, меди. Диэлектрическая проницаемость такой «низкотемпературной» керамики – 5,7.

Сырая керамика изготавливается на основе окиси алюминия. Покрытие – проводящий материал – сплав никеля с железом (42–58 %) имеет близкий к керамике температурный коэффициент линейного расширения.

Перспективны два направления технологии: с использованием бескорпусных чипов и корпусированных элементов. Обработка бескорпусных чипов производится по гибридной технологии: изготавливают печатные проводники шириной 300 мкм и расстоянием 400 мкм. Резисторы в стандартном исполнении имеют номиналы от 10 Ом до 2 мОм ± 1 % для толстопленочной и ±0,5 % для тонкопленочной технологии. Температурный коэффициент сопротивления резисторов может быть равен $\pm 25 \cdot 10^{-6}$ К. Для ГИС используются многослойные конденсаторы. Значительные затраты при изготовлении электронных узлов приходятся на ПП. Стоимость МПП может быть в десятки раз выше стоимости ПП с двумя слоями. Для увеличения коэффициента заполнения некоторые фирмы монтируют элементы (резисторы, конденсаторы) на стороне пайки. При этом предварительно обеспечивается их приклейка на соответствующих местах, а затем – пайка волной.

Стоимость чипа на 20–30 % меньше элементов в обычном исполнении. Выводы чипов подключаются с помощью сварки. Модульное построение (на один узел от 3 до 22 чипов) узлов с чипами дает возможность проведения текущего контроля во время изготовления.

Перспективная технология получения двустороннего проводящего рисунка с металлизированными сквозными отверстиями – SSP-II. Он обеспечивает высокую надежность соединений, характерную для субтрактивной технологии, и низкую стоимость ПП, присущую аддитивной технологии. Данный способ предусматривает печать двустороннего рисунка электропроводящей пастой (до трех проводников между выводами ИС), изготовление отверстий (пробивкой или сверлением), специальную обработку отверстий (покрытие стенок высокомолекулярной пленкой), активацию стенок отверстия палладием, печать резиста (с предварительной грунтовочной металлизацией), химическую и электролитическую металлизацию отверстий и контактных площадок, исключение резиста и грунтовки, печать паечного резиста и маркировки. Факторы, снижающие стоимость ПП: низкий расход меди, возможность применения электроизоляционного материала с бумажным наполнителем без снижения надежности соединений через металлизацию от-

верстий, сокращение времени на химическую металлизацию (относительно аддитивного процесса).

3.8.7. Печатные платы на металлических основаниях

С увеличением функциональных возможностей РЭС увеличивается число элементов, размещаемых в ПП, возрастают требования, предъявляемые к подложкам. Для монтажа мощных микросхем требуются подложки с высоким теплоизлучением. Роль панелей для монтажа электродвигателей способны выполнять ПП на жестких основаниях из магнитного материала. При этом сама подложка со схемой управления конструктивно объединяется с корпусом электродвигателя, что позволяет существенно уменьшить габариты и переходить на более плоские конструкции. Для обеспечения миниатюризации и компактного исполнения аппаратуры необходимы также ПП на подложках, поддающихся изгибу и формованию. Наличие таких подложек позволяет конструктивно объединить ПП с шасси приборов и способствует их более компактному исполнению. Кроме того, способность ПП работать на изгиб позволяет уменьшать число проводников на обратной стороне шасси и сокращать число операций пайки. С возрастанием степени миниатюризации и плоскостности РЭС увеличивается доля использования безкорпусных компонентов, что также расширяет диапазон требований, предъявляемых к свойствам материалов для изготовления оснований ПП.

Появление большой разновидности микрокорпусов потребовало создания новых плат, обеспечивающих использование технологических преимуществ микрокорпусов. При реализации поставленной задачи конструкторы изделий должны были решить три основных вопроса:

– обеспечение совместимости плат и микрокорпусов;

– обеспечение достаточно высокой плотности межсоединений, которая согласовывалась бы с плотностью входных и выходных контактных площадок в микрокорпусах;

– обеспечение надежного теплоотвода от микрокорпусов, рассеивающих большую мощность.

Обеспечение высокой плотности межсоединений выполняется за счет уменьшения размеров печатных проводников и расстояний

между ними или за счет расположения печатных проводников в толщине платы, т.е. путем создания межслойных конструкций монтажных плат с числом слоев до 20 и более.

Отвод тепла от микрокорпусов является одной из основных проблем из-за большой энергонасыщенности современных схем. Конструкторы определили два основных пути ее решения:

– использование в платах новых, главным образом, металлических материалов, хорошо проводящих тепло;

– разработка специальных теплоотводов, в том числе с принудительным охлаждением.

В этих условиях особое внимание специалистов привлекают технологии с использованием металлических пластин для изготовления оснований ПП. Присущие металлу свойства: обрабатываемость, прочность, теплопроводность, стабильность размеров, магнетизм, способность к электромагнитному экранированию – позволяют получать совершенно новые характеристики оснований, которые труднодостижимы у традиционных материалов. Основная проблема заключается в изготовлении изолирующей основы из материала основания (или на нем). В зависимости от технологии были предложены различные материалы и методы.

Печатные платы на металлическом основании (ПП) представляют собой новый вид плат, способных удовлетворить потребности современных РЭС, которые в настоящее время невозможно получать, используя в качестве подложек такие традиционные материалы, как керамика на основе окиси алюминия, стеклоткань с эпоксидным наполнителем, бумажно-фенольный материал и др. Керамические платы относительно дороги, хрупки, по габаритным размерам не превышают 50×50 мм. Стеклоэпоксидные платы плохо проводят тепло, не металлизируются, поэтому не пригодны для создания многослойных конструкций. По прогнозам зарубежных специалистов использование в качестве подложек металлов (стали, покрытой эмалью, алюминия и его сплавов, железа и др.), а также объединение технологий (толсто-, тонкопленочной и др.) приведут к резкому снижению стоимости ПП.

Применение металлических оснований вместо органических материалов значительно упростит утилизацию отходов, бракованных и вышедших из строя ПП, при этом улучшается экологическая обстановка при производстве и эксплуатации ПП.

Однако накопленный к настоящему времени опыт создания и применения металлических подложек свидетельствует о наличии нерешенных проблем и отсутствии оптимального решения. Поэтому актуальным является анализ преимуществ и недостатков металлических подложек, рассмотрение конструктивных и технологических возможностей, выбор перспективных направлений.

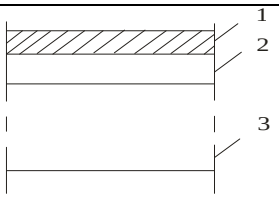
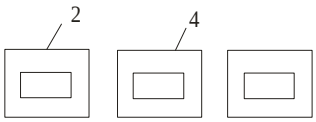
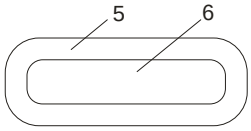
3.8.8. Материалы и конструкции оснований ППМ

Существует несколько разновидностей подложек с металлическим основанием, отличающихся структурий, способом изоляции, технологией формования схемных коммуникаций. Основание может быть изолировано от медной фольги неорганическим материалом (эмалью) или полимерным материалом (слоем эпоксидной смолы). Изолирующее покрытие можно создавать методом электроосаждения, напыления псевдоожиженного слоя или с помощью органического связующего. При формовании рисунка схемы применяют субтрактивный, аддитивный и полуаддитивный методы.

В табл. 22 даны основные виды ППМ.

Таблица 22

Основные виды печатных плат на металлическом основании

Характеристика	Основания на металлических пластинах	Основания с металлическими сердечниками	Основания на эмалированных пластинах
1	2	3	4
Конструкция			
Материал основания	Алюминий, железо	Сталь, алюминий	Сталь и т.д.
Материал изоляционного слоя	Эпоксидная смола, эпоксидный стеклопластик, полиимид, полиимидоамид	Эпоксидная смола	Эмаль
Толщина изоляционного слоя, мкм	20…300	150…300	100…200

Окончание табл. 22

1	2	3	4
Технология формирования схемы	В основном субтрактивный метод	Аддитивный метод	Метод толстопленочной печати
Достоинства	Возможность обработки на традиционном оборудовании. Возможность формирования рисунков на большой площади	Отсутствие областей металла и высокая коррозионная стойкость. Возможность металлизации отверстий. Возможность монтажа компонентов с выводами	Термостойкость, высокая теплопроводность, низкая стоимость при использовании плат из неблагородных металлов

Примечание. 1 – медная фольга; 2 – изоляционный слой; 3 – металлическая пластина; 4 – металл; 5 – эмаль; 6 – железная пластина.

В новой конструкции подложек IMST используется эпоксидная смола с неорганическим наполнителем высокой теплопроводности. По сравнению с обычными в ППМ, изготовленных обычным субтрактивным методом, используют органическое связующее для прикатывания медной фольги к поверхности металлического основания. Для изготовления металлического основания применяют алюминий, кремнистую сталь, железо и другие металлы. Толщина основания варьируется от 0,2 до 5 мм. Алюминий характеризуется большим коэффициентом теплопроводности и используется для обеспечения высокой теплоизлучающей способности. Его достоинствами являются также легкость и невысокая стоимость. Толщина основания, как правило, 1–2 мм. Кроме того, алюминий отличается высокой пластичностью, что позволяет проводить операции изгиба и формования подложек. В этих случаях толщина оснований составляет 0,5–1 мм. В качестве материала для оснований при монтаже электродвигателей используют кремнистую сталь. Поскольку она подвергается коррозии, то изоляционное покрытие наносят на обе стороны поверхности основания. Толщина основания может доходить до 1 мм, но чаще составляет 0,5 мм. Железо также используют при необходимости монтажа электродвигателей, и поскольку оно так же, как и кремнистая сталь, может разрушаться в результате коррозии, то обе стороны поверхности основания покрывают оловом, цинком или алюминием. Наносят покрытие методами расплавления или металлизации. Толщина оснований из железа вследствие большой удельной массы материала в большинстве случаев составляет 0,5–1,2 мм.

В аппаратуре специального назначения в качестве материала оснований могут использоваться другие материалы: сплавы алюминия, латунь, фосфористая бронза и др.

Изоляционный слой обычно изготавливают из стеклоткани с эпоксидным наполнителем (препрег). Толщина стеклоткани варьируется от 0,05–0,2 мм, но в большинстве случаев равна 0,1 мм. В качестве наполнителя, как правило, используют эпоксидную смолу. Для обеспечения повышенной термостойкости применяют смолу, соответствующую подложкам с маркой NEMAFR3-5, и полиамидную смолу. Хорошую адгезию препрега к металлическому основанию и повышенную термостойкость подложек получают в результате механической или химической обработки поверхности основания. Склеивание такого основания препрега и фольги выполняют на прессах, оборудованных стальными плитами для подогрева.

Препрег изготавливают путем погружения стеклоткани в лак на основе эпоксидной смолы и сушки пропитанной этим лаком стеклоткани. Способ получения подложек методом термокомпрессии запатентован.

При использовании полимерной пленки на обе стороны поверхности термостойкой пленки, например, из полиамидной смолы, наносят адгезивный материал. Затем эту заготовку сушат и, применяя пленку с адгезивным материалом в качестве склеивающей прокладки, прессуют подложки, представляющие собой фольгированные медью металлические основания, методом термокомпрессии аналогично получению препрега. Такую изоляцию используют, если необходимо получить высокое допустимое напряжение пробоя. Если изоляция между металлическим основанием и медной фольгой обеспечивается только с помощью смолы, медную фольгу покрывают специальным адгезивным материалом, совмещают с металлическим основанием и склеивают методом термокомпрессии. Этот вариант используют, когда производят изгиб или формование подложек. В качестве основы для коммутационного слоя, как правило, применяют медную фольгу, полученную электролитическим осаждением. При проведении операций изгиба и формования подложек используют фольгу, наготовленную прокаткой. Таким образом, основания ПП на металлических пластинах структурно представляют собой единство трех слоев – металлической пластины, изоляционного слоя и медной фольги.

В зависимости от материала основания, изоляционного слоя и способа получения фольги существуют марки подложек, предназначенные для плоских конструкций, и подложек, используемых при

операциях изгиба и формования. В качестве примера рассмотрим конструкции, наиболее часто применяемые в качестве подложек.

В металлических подложках с изоляционным основанием алюминиевая заготовка покрыта с обеих сторон анодным окислом алюминия (рис. 49). С одной стороны нанесен слой медной фольги поверх изолирующей прослойки из эпоксидной смолы.

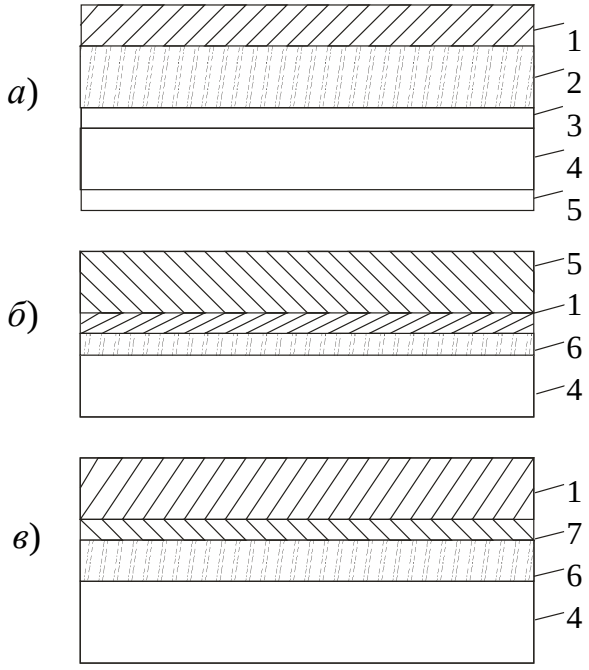


Рис. 49. Односторонние алюминиевые подложки:
а – подложка типа IMST (1 – медная фольга; 2 – эпоксидная смола; 3 – анодный оксид алюминия; 4 – алюминиевое основание);
б – подложка типа H1TT (5 – алюминиевая фольга; 6 – изоляционный слой);
в – подложка типа NRCB (7 – резистивная пленка)

На рис. 50 представлено поперечное сечение платы другого типа. В качестве изолирующего слоя между алюминиевой подложкой и медной фольгой используют эпоксидную смолу.

В новой конструкции подложек IMST используется эпоксидная смола с неорганическим наполнителем высокой теплопроводности. По сравнению с обычными подложками, которые имеют тепловое сопротивление 2,2 К/Вт, у новой конструкции оно составляет всего 1,7 К/Вт, поэтому размер схемы можно уменьшить на 30 %. Кроме того, анодная оксидная пленка является твердой и защищает алюминий от механического повреждения в процессе изготовления. Для уплотнения пленки используют погружение в горячую воду при 370 К на 6 мин, известное как метод полууплотнения. Это является

эффективным способом сведения к минимуму образования трещин в пленке, вызываемых тепловым скачком при 473 К и во время пайки, а также обеспечивает коррозийную стойкость.

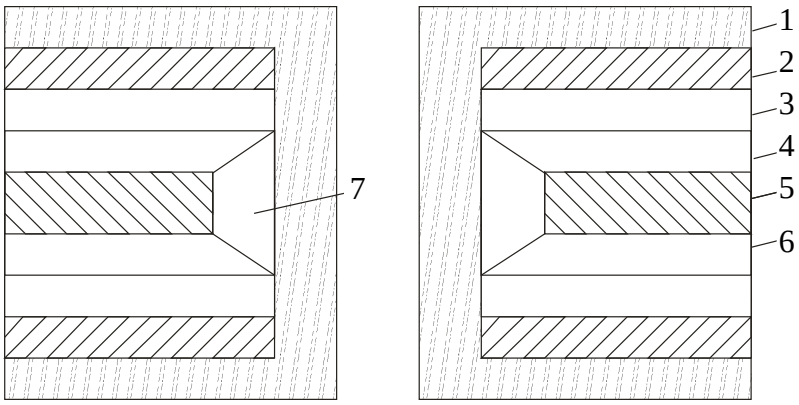


Рис. 50. Конструкция многослойной печатной платы фирмы NTT:
1 – медное покрытие; 2 – алюминиевая фольга (толщиной 0,1 мм); 3, 4 – анодный оксид на поверхности алюминиевой фольги (толщиной 45 или 15 мкм); 5 – алюминиевая подложка (толщиной 1,0 мм); 6 – адгезив (толщиной 2,5 мкм); 7 – электроосажденная смола (100–150 мкм)

Более широкое распространение получили алюминиевые подложки типа H1TT, разработанные компанией The Electro Chimical-Industrial Co., Ltd.

На рис. 49,*б* представлено поперечное сечение платы H1TT. В качестве изолирующего слоя между алюминиевой подложкой и медной фольгой используют эпоксидную смолу, содержащую наполнитель с высокой теплопроводностью. В результате термосопротивление смолы снижается до 0,72 К/Вт. Медная фольга плакируется алюминиевой фольгой толщиной 40 мкм, селективно травленной в местах монтажа проволочных соединений с подложкой.

Подложка типа NRCB фирмы Nittro Electric Industriel Co, Ltd включает резистивный слой на изолирующей поверхности и используется при изготовлении резистивно-коммутационных микроплат. Поперечное сечение подложки NRCB показано на рис. 49,*в*. Многослойная печатная плата на основе анодированного алюминия (MPCB) имеет конструкцию, показанную на рис. 50. Вместо медной фольги используют анодированную с одной стороны алюминиевую фольгу, которую приклеивают к анодированной алюминиевой подложке с просверленными отверстиями. Высокая адгезия между анодированной алюминиевой подложкой и анодированной алюминиевой фольгой гарантирует хорошую теплопередачу, а ПП фирмы NTT обеспечивают устойчивое рассеивание тепла.

Печатные платы на алюминиевой основе фирмы Hitachi Ltd., называемые MC-100E, имеют почти такую же структуру, как алюминиевые платы фирмы NTT. Жесткая печатная плата с наибольшим теплоизлучением имеет поперечное сечение, показанное на рис. 51,*а*. При повышении температуры на 100 К изменение размеров платы не превышает 0,15 %. В двусторонней плате формируются сквозные отверстия, и осуществляется их пропитка для изоляции от алюминиевой основы, рис. 51,*б*.

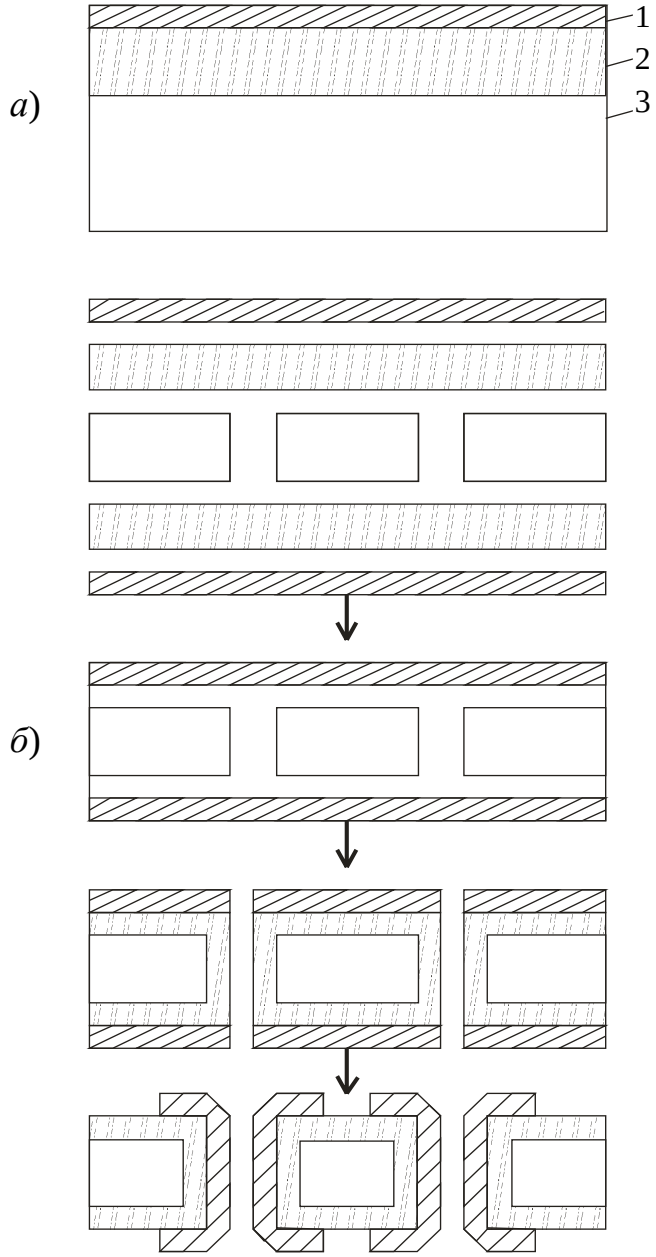


Рис. 51. Двусторонняя печатная плата:
а – конструкция (1 – медная фольга; 2 – изолирующий слой;
3 – алюминиевая фольга);
б – технологическая последовательность изготовления

В гибких ПП, спрос на которые возрастает с каждые годом, в качестве несущих пленок используют полиэфир и полиамид, обладающие достаточной химической устойчивостью, теплостойкостью, совместимостью с припоем и хорошими изоляционными свойствами. Технология изготовления платы состоит из трех основных этапов изготовления металлического основания, создания коммутационной схемы и их соединения. В качестве металлического основания используется стальная или алюминиевая пластина, в которой пробивают отверстия. Затем пластина подвергается механической обработке для удаления заусенцев и покрывается изолирующим слоем, включая стенки отверстий. Схему проводников изготавливают отдельно, для чего используют тонкую (125 мкм) пленку диэлектрика – стеклоэпоксид или полиамид, на которую наносят медную фольгу. Блок из шести заготовок (слоев фольгированного диэлектрика), сложенный для механической обработки, сверлят, затем на каждой заготовке травлением формируют проводящий рисунок. Готовую проверенную схему покрывают защитной пленкой. Заключительная операция изготовления плат – напрессовка коммутационной схемы на металлическое основание. В валковой установке на поверхность металлической заготовки наносят анаэробный клей. Схему накладывают на основание и добиваются точного совмещения по отверстиям. Затем собранную плату закладывают в пресс, где клей отверждается при 469 К.

Более современным является метод, разработанный фирмой Nippon Miktron Ltd. К алюминиевой фольге толщиной 50 мкм приклеивают слой медной фольги с помощью адгезива. Травлением формируют рисунок металлизации. Алюминиевая фольга обеспечивает высокое постоянство геометрических размеров, что позволяет изготавливать разводку с высокой степенью интеграции (порядка 10–20 линий). Фирма Exacta разработала два варианта слоистых подложек (A и B), названных Chipstarte, специально для напайки безвыводных компонентов непосредственно на поверхность платы. Новый эластомерный материал, из которого изготовлен верхний слой, полностью устраняет повреждения.

Эластомеры (полиамиды, эпоксидные смолы, смеси нитрилового каучука с фенольными смолами) являются диэлектриками, широко применяемыми в промышленности, имеют сравнительно низкую диэлектрическую проницаемость (2–5). Процесс изготовления плат с эластомерными покрытиями схож с процессом изготов-

ления обычных ПП, и переход промышленности на выпуск плат с эластомерным покрытием не вызывает серьезных трудностей.

Конструкция плат Chipstarte с межсоединениями гибкая, и поэтому для придания ей необходимой механической прочности, а также для обеспечения теплоотвода платы приваривают к несущим конструкциям из алюминия, AI2O3-керамики или стеклоэпоксида. Однако из-за гибкости подложки эти платы имеют ограниченные размеры. Еще одним недостатком является то, что процесс последовательного изготовления отдельных слоев межсоединений в виде структур из полимера и проводников является весьма трудоемким. А при работе схемы возникает повышенная емкостная нагрузка вследствие малых промежутков (0,05 мм) между слоями сигнальных проводников. Подложки Multiwireu Microware имеют металлическое основание с нанесенным на него полимером, в который по заранее заданному рисунку запрессованы изолированные проводники. Затем подложку подвергают термообработке при умеренной температуре от 433 до 473 К. При этом в нанесенном полимере образуются перекрестные связи. Эти подложки имеют хорошие тепловые свойства потому, что участком с наибольшим тепловым сопротивлением является изоляция проводников, образующих матрицу межсоединений.

Примером новейших разработок ПП на металлическом основании являются разработанные фирмой Toshiba Corp. толстопленочные полимерные подложки с металлическим основанием, на которые методом шелкографии наслаивают изоляционную резистивную и проводящую пасты и формируют толстопленочную схему полимерного типа.

Однако до тех пор, пока полимерные толстые пленки не станут способными к пайке, они не составят серьезную альтернативу меди с гальваническим покрытием. Кроме того, вызывает сомнение температурная устойчивость РТГ-резисторов, пока нет пасты для них, которая могла бы сохранить стабильно ТКС.

3.8.9. Конструирование гибких схем

Поскольку гибкие схемы представляют собой токопроводящий рисунок печатной платы, размещенный на гибком основании и покрытый сверху гибкой защитной пленкой (защитная пленка в некоторых случаях может отсутствовать), то необходимым условием

для понимания конструкций гибких схем является хорошее знание материалов, применяемых для производства гибких схем.

Один из основных этапов проектирования гибких схем – это выбор надлежащей подложки и защитной пленки. (Защитная пленка изолирует протравленный рисунок схемы так же, как это делает защитная маска при производстве печатных плат). Вообще говоря, существует большое количество материалов, которые могут быть использованы для производства подложек. Но на производстве в основном используются два из них – полиамид и полиэстр.

Другие пленки (например из тефлона) также используются, но делается это в специфических случаях.

Наиболее популярным материалом при производстве гибких схем является полиамидная пленка. Полиамидная пленка выдерживает нагрев, возникающий при пайке. Она не содержит органических сольвентов и не может быть расплавлена. Благодаря своим высоким показателям эта пленка используется также для изоляции проводов, обмоток трансформаторов и моторов. Полиамидная пленка поставляется производителями со следующими стандартными толщинами – 0,0127; 0,0254; 0,0508; 0,0762; 0,127 мм.

Название пленки Каптон (Kapton) является торговой маркой компании E.I.du Pont de Nemours & Company. Существует несколько специализированных типов пленки каптон, но они применяются только в особых случаях. Примером этих материалов могут служить:

- Kapton XT: имеет повышенную теплопроводность; используется, например, в термопечатающих принтерах;
- Kapton XC: пленка с токопроводящим наполнением, создающим зону электропроводности.

Полиэстровая пленка обладает вполне приличными свойствами и широко используется. Химическое название этой пленки – polyethelyne terephalate. Полиэстр (Mylar) является продуктом реакции конденсации этиленгликоля (ethylene glycol) и терефталиковой кислоты (terephthalic acid). Крупнейшим производителем этой пленки является E.I. du Pont de Nemours & Company, которая продает эту пленку под торговой маркой Mylar. Полиэстровая пленка имеет относительно низкую стоимость: около 1/20 цены полиамидной пленки. Пленка не содержит пластификаторы и поэтому не становится хрупкой с течением времени. Она очень устойчива к растворителям и другим химикатам, имеет высокую прочность на разрыв и хоро-

шую диэлектрическую прочность. Диапазон рабочих температур этой пленки лежит в пределах от 70 до 150 °С. Малая температурная стойкость пленки проявляется на стадиях пайки. Существует несколько достаточно очевидных способов преодоления этой проблемы. Один из них – применение плат с толстой подложкой толщиной приблизительно 0,13 мм. В этом случае становится возможной пайка волной.

Полиэстр широко используется в автомобильных и коммуникационных схемах и экономически выгоден.

Арамид (Notex) – материал с неупорядоченной структурой фирмы Du-Pont. Арамид применяется в качестве защитной пленки. Арамид – высокотемпературная бумага, хорошо переносящая температурный режим, возникающий при операциях пайки. Бумажная основа обусловливает гигроскопичные свойства арамида и, следовательно, способность поглощать и переносить реактивы в процессе обработки. Арамид имеет достаточно низкую стойкость к возникновению и распространению разрывов. Материал имеет относительно низкую диэлектрическую проницаемость – примерно половина от диэлектрической проницаемости Каптона.

Полиэстр-эпоксид (BEND/flex) – материал для изоляции, выпускающийся фирмой E.I. du Pont de Nemours & Company со следующей гаммой толщин: 0,0127; 0,0254, 0,0508 и 0,0762 мм. При производстве материала используется сетка из полиэстра Dacron и стекловолокна, которая наполнена эпоксидной смолой в В-стадии. На эту сетку накладывается медная фольга, и все это накладывается на подложку без использования дополнительного клеящего материала. Примером такого материала могут служить платы, выпускаемые под названием BEND/flex. Платы BEND/flex внешне похожи на жесткие печатные платы, но они могут подвергаться значительным деформациям, например, могут быть согнутыми в трехмерную конструкцию без нагревания.

Для производства гибких печатных плат обычно используется фольга из меди. Основным параметром медной фольги является ее вес, отнесенный к единице площади. Этот способ измерения количества (и косвенно толщины) фольги пришел в промышленность из торговли. Для производства большинства гибких схем достаточно следующей номенклатуры фольги: 1/2, 1, 2 унции/фут^2, что в метрической системе будет равно: 0,1525, 0,305, 0,610 кг/м^2 соответственно. При необходимости создания мощных дорожек может использоваться и более толстая фольга.

Существуют два способа производства медной фольги:

- электролитический способ;
- производство путем холодной прокатки.

Медная фольга получается путем осаждения меди (электролитический способ) на барабан из нержавеющей стали в электролитической ванне. Толщина фольги зависит от времени электролиза. После достижения фольгой заданной толщины она удаляется с барабана на катушки. Та сторона фольги, которая прилегала к поверхности барабана, имеет гладкую поверхность и не нуждается в полировке. Напротив, внешняя сторона имеет неровную поверхность, которая обеспечивает в дальнейшем хорошую адгезию. Зерна электролитической фольги имеют достаточно упорядоченную структуру, что обеспечивает прекрасные связующие свойства с гибкими пленками, но сильно ухудшает способность пленки к изгибу.

Исходным материалом для производства холоднокатаной медной фольги служат медные слитки, полученные следующим образом: медь, полученную электролитическим способом, переплавляют в слитки, это позволяет контролировать процесс затвердевания, чистоту металла, его структуру, а также наличие пустот, которые оказывают решающее влияние на качество получаемой в дальнейшем фольги. Полученные слитки имеют массу до нескольких тонн. Эти слитки прокатываются горячим способом через калибровочные устройства, что обеспечивает заданный размер слитка и отсутствие дефектов. Затем калиброванные слитки подвергаются холодной прокатке с последующим отжигом полученной фольги на специальных барабанах, входящих в состав прокатного стана.

Прокатная медь очень гибка и пригодна для использования в платах, подвергающихся большим динамическим нагрузкам. Прокатная медь допускает от 100 до 1 млн циклов перегиба без разрушения. Существует множество сортов холоднокатаной меди, но только некоторые из них применяются в производстве. В основном сорта медной фольги различаются по жесткости. Некоторые сорта меди имеют собственное название, например, «LTA медь» производства Thin Strip Brass Group, Sommers Division of Olin Corporation. Этот сплав называется также «110». Он достаточно жесток для применения в гибких платах и поэтому фольге из этого сплава необходим предварительный отжиг. Отжиг проводится при температуре, возникающей при прокатке фольги. Это обеспечивает легкость обработки тонкой меди без вытяжек и морщин. Подготовленная таким образом медная фольга используется в гибких платах.

Защитные пленки являются третьим компонентом большинства гибких схем. Существует множество различных видов пленок, но при производстве гибких схем используются в основном три из них:

- полиэфирные;
- эпоксидные;
- акрильные.

Каждый тип и около десятка его модификаций полностью удовлетворяют нужды производства.

Основу (эпоксидных) пленок составляет видоизмененный эпоксид, известный под названием phenolic butyrals and nitrite phenolics. Эти пленки дешевле пленок на основе акрила, но дороже полиэфирных пленок. Эпоксидные пленки широко применяются. Они имеют хорошую температурную стойкость и свободно выдерживают нагрев, возникающий при пайке, а также сохраняют стабильные свойства при температурах 120 °С и выше.

Полиэфирные пленки имеют минимальную стоимость. Главная отрицательная сторона этих пленок – низкая тепловая стойкость, но она не так важна, если пленка применяется в платах, не требующих пайки при сборке, как во многих автоматических конструкциях.

Пленки на основе акрила (акриловые пленки) – наиболее широко использующиеся пленки в случаях, когда они применяются в паяющихся конструкциях при высокой температуре. Такие пленки некоторое время могут выдерживать сильное нагревание.

Производство гибких плат во многом отличается от производства жестких плат. Во-первых, это другие исходные материалы, во-вторых, имеются различия в правилах проектирования и технологии производства.

Гибкие схемы имеют две области применения, которые принципиально различаются: это применение в статическом и динамическом режимах. В статическом режиме гибкая плата соединяет неподвижно расположенные узлы и принимает не меняющуюся с течением времени форму. В динамическом режиме плата соединяет части, двигающиеся друг относительно друга и соответственно меняющая форму и положение в процессе эксплуатации. Таким образом, к платам, работающим в разных режимах, предъявляются различные требования и они должны изготовляться из разных мате-

риалов. Ниже приведена табл. 23, показывающая характер поведения того или иного материала в различных режимах применения.

Таблица 23

Свойства материалов при обработке и в применении

Применение	Электролитическая медь	Холоднокатаная медь	Полиамидная пленка	Полиэстерная пленка	Комбинации
Статика	отлично	хорошо	хорошо	хорошо	хорошо
Динамика	плохо	отлично	отлично	хорошо	плохо
Инструмент	отлично	хорошо	отлично	хорошо	хорошо
Автоматы	отлично	хорошо	плохо	отлично	плохо
Телекоммуникации	отлично	хорошо	хорошо	отлично	хорошо

Гибкие печатные платы

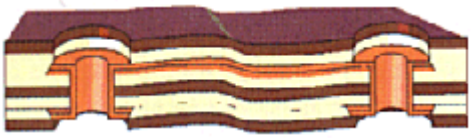
Использование гибких диэлектрических материалов для изготовления печатных плат дает как разработчику, так и пользователю электронных устройств ряд уникальных возможностей. Это прежде всего – уменьшение размеров и веса конструкции, повышение эффективности сборки, повышение электрических характеристик, теплоотдачи и, в целом, надежности. Если учесть основное свойство таких плат – динамическую гибкость – становится понятным все возрастающий объем применения таких плат в автомобилях, бытовой технике, медицине, в оборонной и аэрокосмической технике, компьютерах, в системах промышленного контроля и бортовых системах. Гибкие печатные платы (ГПП) изготавливаются на полиамидной или лавсановой пленке и поэтому могут легко деформироваться даже после формирования проводящего рисунка. Большая часть конструкций гибких ПП аналогична конструкциям печатных плат на жесткой основе.

Односторонние ГПП наиболее распространены в этом классе плат, поскольку проявляют наилучшую динамическую гибкость. Контактные площадки таких плат расположены с одной стороны, в качестве материала проводящей фольги чаще всего используется медь.





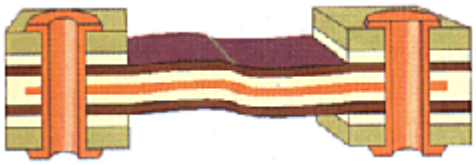
Односторонние ГПП с двусторонним доступом имеют один проводящий слой, контактные площадки к которому выполнены с обеих сторон платы.



Двусторонние ГПП имеют два проводящих слоя, которые могут быть соединены сквозными металлизированными переходами (на рисунке проводники нижнего слоя идут перпендикулярно проводникам верхнего слоя). Платы этого типа обеспечивают высокую плотность монтажа, часто применяются в электронных устройствах с контролируемым полным сопротивлением (импедансом) плат.



Многослойные ГПП содержат не менее трех проводящих слоев, соединенных металлизированными отверстиями, которые обеспечивают межслойное соединение. В таких платах проще реализовывать высокую плотность монтажа, поскольку не требуется обеспечивать большие значения соотношений «высота /диаметр отверстия». Прогнозируется применение таких ГПП для сборки на них многокристальных интегральных схем.



Жестко-гибкие ПП являются гибридными конструкциями и содержат как жесткие, так и гибкие основания, скрепленные между собой в единую сборку и электрически соединенные металлизированными отверстиями. Наиболее распространены в изделиях оборонной техники, однако расширяется их применение и в промышленной электронике.



ГПП с местным ужесточением (*укреплением*). В таких платах возможно размещение внутри гибкой основы жестких металлических деталей. Получаются многоэтапным процессом фотолитографии и травления.

3.8.10. Технологии получения микроотверстий

В промышленности применяют четыре основных способа формирования микроотверстий:

- фотолитография – отверстия получают воздействием раствора проявителя на диэлектрик;
- плазма – отверстия получают травлением медной фольги и последующим вскрытием диэлектрика (воздействием плазмы);
- механическим способом – отверстия получают механическим сверлением или воздействием пемзы;
- с применением лазера, отверстия получают удалением меди и диэлектрика путем их разложения под действием лазерного луча; после получения отверстий производится обычная химическая и электрохимическая металлизация стенок глухих отверстий для осуществления проводящего соединения между слоями.

Ограничения технологии электрохимической металлизации микропереходов:

- отношение толщины слоя диэлектрика к диаметру отверстия микроперехода должно быть не более 1:1;
- прямая металлизация дает хорошие результаты при металлизации глухих микропереходов, обеспечивая хорошую адгезию, полное покрытие, однородность осаждения.

Микропереходы в наружных слоях МПП могут быть реализованы в обычном производстве. При введении технологии микропереходов в текущую технологию МПП производители должны выбирать методы, которые обеспечат минимизацию капитальных затрат и людских ресурсов.

Основным направлением технологии высокоплотных соединений с помощью микропереходов является технология послойного наращивания перераспределительных слоев – наружных слоев, в которых располагаются проводники, соединяющие выводы микросхем с монтажными контактными площадками для подключения, – с внутренними слоями проводников ПП.

Технология микропереходов на основе фотообрабатываемого диэлектрика требует значительных инвестиций в оборудование, существенного улучшения контроля фотошаблонов и проявления изображения. Кроме того, аддитивные процессы металлизации являются источниками трудностей получения адгезии.

Толстые слои фотодиэлектрика эффективней получать с помощью сухого пленочного фотодиэлектрика, так как растворитель из него уже удален производителем этого материала на стадии производства. Поэтому отсутствуют процессы усадки его при ламинировании на подложку.

Жидкий диэлектрик за одно покрытие наносится толщиной 20–30 мкм (в зависимости от метода нанесения). С помощью сухого пленочного диэлектрика с одного прохода достигается толщина 25–65 мкм с высокой равномерностью толщины.

Пленочный диэлектрик наносится одновременно на обе стороны заготовки, жидкий диэлектрик наносится поочередно на каждую сторону, и обычно для получения нужной толщины требуется несколько проходов.

Сухой пленочный диэлектрик не содержит пузырьков и проколов, это исключает появление непредусмотренных микропереходов. В жидком диэлектрике из-за несовершенных условий производства обычно имеются пузыри, отверстия, пыль и другие загрязнения. Сухая пленка защищена от проколов и царапин специальной пленкой, которая в дальнейшем отслаивается. Нанесенный жидкий диэлектрик специально ничем не защищается. Сухой пленочный диэлектрик обеспечивает высокую степень планаризации, что дает высокий процент выхода годных.

Обработка фотодиэлектрика:

- проявление (травление) фотодиэлектрика производится в водно-щелочном растворе. Используется типовое оборудование для выполнения следующих операций:
- подготовка поверхности – химическая плюс оксидирование или химпассивирование;
- вакуумное ламинирование – 62 °С / 60 с;
- экспонирование – 800 мДж;
- термообработка после экспонирования – 20 мин при 105 °С;
- проявление (травление) – водное, на основе NaOH;
- полимеризация – 2 Дж ультрафиолета плюс 1 ч при 145 °С.

Широкое применение фоточувствительного диэлектрика для формования микроотверстий сдерживается малым процентом выхода годных из-за неоднородности толщины диэлектрика, надежности экспонирования и травления, плохой адгезии меди.

Для плазменного формования микроотверстий обычные плазменные установки, используемые для очистки от замазывания или для обратного травления стенок отверстий, применить невозможно. Требуются специально разработанные для этих целей установки.

Применяют несколько типов лазеров для формирования микроотверстий, такие как эксимерный УФ лазер, Nd-YaG лазер и CO_2 лазер. Энергия лазерного луча оптически концентрируется в очень узкий луч для формирования малых отверстий. Эксимерный лазер с короткой волной может производить чистые отверстия с вертикальной стенкой во многих подложках – керамике, стекле и в полимерах. Nd-YaG лазер используется для сверления металла, в том числе меди, стали и полимеров. CO_2 лазер хорошо сверлит полимеры, работает с длиной волны 10,591 мкм.

Диэлектрический материал должен поглощать достаточное количество световой энергии, чтобы разогреться для испарения. Вместе с этим диэлектрик должен быть достаточно прозрачным, чтобы луч мог проникать сквозь него и формировать отверстие без загрязнений. Практически требуется не менее двух импульсов для сверления отверстия диаметром 50 мкм в слое смолы толщиной 50 мкм.

Преимущества лазерного сверления отверстий:

- можно делать отверстия в любом месте в соответствии с программой;
- можно делать отверстия различной требуемой глубины;
- не образуется большого побочного загрязнения.

Недостаток лазерного сверления отверстий – более высокая стоимость процесса по сравнению с фотоформованием отверстий для плат с очень большим числом отверстий.

Выбор материала. В технологии сверления микроотверстий используют материалы:

- FR-4 ламинат или препрег с фольгой;
- фольга, покрытая смолой (RCC);
- арамидный ламинат или препрег с фольгой;
- полиамидный пленочный ламинат;
- препрег на основе фторопласта.

Выбор материала зависит от способа формирования микроотверстий. Например, неорганические армированные материалы плаз-

ма травить не может. Полиамидная пленка отличается от подложки из FR-4 по химическому составу, поэтому плазменная обработка отверстий под металлизацию будет значительно сложнее. FR-4 и покрытая смолой фольга являются наиболее подходящими материалами для реализации микропереходов в обычной технологии, так как их химический состав совместим с основным материалом и их однородность обеспечивается условиями этапов их производства.

Покрытая смолой фольга (табл. 24) обеспечивает гладкую поверхность, тонкий диэлектрик и стандартные операции прессования, а также легкость удаления диэлектрика при формировании микроотверстий, так как он однороден и не армирован инородным материалом.

Таблица 24

Преимущества проектирования МПП с покрытой смолой фольгой (RCC)

Перераспределение связей	Жестко-гибкие печатные платы	Микрокорпуса
Высокая плотность компоновки	Слой защиты плюс сигнальные слои в жесткой части платы	Тонкие слои для подключения микросхем
Поддержка высокоплотных микросхем(BGA) и др.	Меньшая стоимость, чем защитный слой Kapton	Нет армировки, что лучше для влагостойкости
Реализация микропереходов и глухих переходов	Большая гибкость, чем у армированных подложек	Нет армировки, что упрощает формирование выводов
Уменьшение количества слоев, 12-слойные МПП преобразуются в 8-слойные (2 сигнальных и 2 слоя земля/питание устраняются)	Низкая диэлектрическая постоянная (3,4)	
Способствует массовому ламинированию 4-слойных подложек		

Для лазерного формования микроотверстий используются две отечественные установки – планшетная и барабанная с растровым сканированием. На них успешно формируются в слоях с диэлектриком толщиной до 0,2 мм глухие микроотверстия диаметром от 0,1 до 0,2 мм.

Фирма Excellon разработала лазерную установку LVD-2001 для высокоскоростного сверления глухих микропереходов во всех типах многослойных печатных плат на заготовках с линейными размерами до 610 × 711 мм. LVD-2001 содержит два лазерных источника с высокой скоростью повторения импульсов, которые обеспечивают оптимизированную высокую скорость сверления слоев диэлектрика и металла. YaG лазер используется для сверления металла, а длинноволновый UU лазер – для удаления диэлектрика. Никакие маски, никакие дополнительные шаги обработки не требуются. В результате достигается высокоскоростное точное сверление (табл. 25).

Таблица 25

Параметры сверления

Диаметр отверстия, мкм	Материал основания	Производительность отв./мин
100	18 мкм медь на FR4	4000
100, глухие	RCC	60 000
100, глухие	FR4	60 000

Таким образом, применение современного оборудования с высоким уровнем машинного зрения и интеллекта, использование новых материалов и химикатов, упрощающих процессы и дружественных к окружающей среде, разработка новых эффективных конструкторско-технологических решений, создание новых крупносерийных производств в сочетании с более совершенной организацией производства – это главные направления развития производства ПП в России.

3.9. Нанесение влагозащитных покрытий

Надежность и длительность срока службы изделий электронной техники находятся в зависимости от условий и режимов эксплуатации, их конструкции и свойств материалов. Нарушение работоспособности может быть вызвано воздействием ряда факторов, в первую очередь это:

1) влияние агрессивной окружающей среды;

2) тепловое старение.

Климатические факторы, влияющие на процессы деградации радиоэлектронных средств, достаточно взаимосвязаны между собой и весьма сильно ускоряют протекание разрушающих электрохимических реакций. В нормальных климатических условиях процессы деградации протекают медленнее.

Печатный монтаж повышенной надежности должен выдерживать следующие воздействия атмосферной среды:

- повышенная влажность в течение длительного времени;
- частые перепады температуры;
- химическая загрязненность среды (сернистый газ, хлориды, аммиак);
- пыль;
- солнечная радиация.

Влагозащитные покрытия призваны уменьшить влияние этих факторов на деградационные процессы в радиоэлектронной аппаратуре.

Печатный узел, не защищенный влагозащитным покрытием, при длительном хранении во влажной среде будет поврежден и при включении с большой долей вероятности выйдет из строя.

Причиной этого будет гигроскопичность подложки печатной платы либо адсорбированный на поверхности платы слой влаги. В условиях нормальной влажности, постоянной температуры и отсутствия пыли основание печатной платы (ПП) обладает высоким сопротивлением изоляции и малыми токами утечки. При повышенной влажности, перепадах температуры, наличии пыли на поверхности платы адсорбируется слой влаги и загрязнений. Этот слой обладает ионной проводимостью, и уже он, а не диэлектрический слой основания ПП, определяет прочность промежутка между проводниками и токи утечки. Ионогенные примеси, не отмывшиеся после пайки, усугубляют положение, увеличивая токи утечки на три-четыре порядка. При включении такого узла возникнут электролитические процессы, приводящие к отказу узла.

Очень опасным является образование под действием влаги гальванических пар, облегчающееся наличием в схемах разнородных металлов (проводники, припои, гальванопокрытия и т.д.). Вследствие этого явления возникает электролитическая коррозия, способная приводить к полному разрушению проводников тонких сечений и металлических покрытий.

Известно, что влагозащитное покрытие не обеспечивает полной изоляции печатного узла. Поэтому повышенная влажность в совокупности с некачественной очисткой печатного узла перед нанесением влагозащитного покрытия может привести к осмотическим процессам. Из-за загрязнений во влажной среде под покрытием образуется концентрированный раствор различных солей, и тем самым создаются условия для осмоса, т.е. начинается интенсивное перемещение влаги под покрытие (рис. 52).

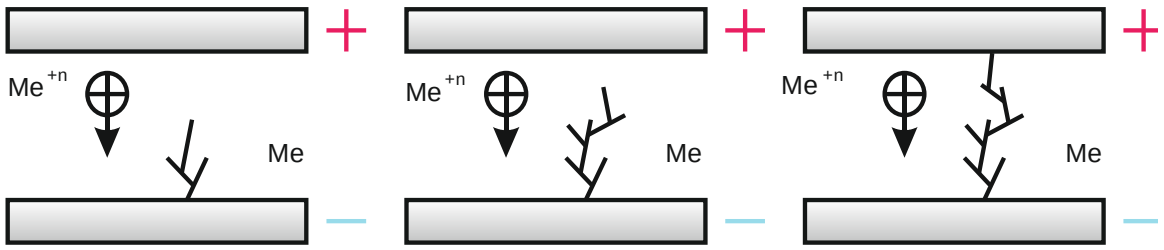


Рис. 52. Отслоение влагозащитной пленки
под действием осмотических явлений

Скорость такого перемещения прямо пропорциональна разности концентраций раствора под покрытием и раствора в наружной пленке влаги. В результате под лаковым покрытием из-за скопившейся жидкости возникает значительное давление, приводящее к отслаиванию и вспучиванию покрытия. Осмотическое накопление влаги под лаковым покрытием при функционировании аппаратуры неизбежно приводит к образованию токопроводящих мостиков, т.е. к отказу ПУ.

Одновременное присутствие в изоляционном зазоре влаги, растворимых загрязнений и электрического напряжения создает условия для протекания электролиза, являющегося основой электрохимического процесса отказа. В результате электролиза проводник-анод растворяется, отдавая воде положительно заряженные ионы металла, которые, направляясь к проводнику-катоду, восстанавливаются на нем до металлического состояния, образуя в изоляционном зазоре проводящие перемычки дендритоподобной рыхлой структуры. В результате этих процессов за несколько минут в водной среде могут образоваться нитевидные кристаллы толщиной 2–20 мкм и длиной до 12 мм (рис. 53).

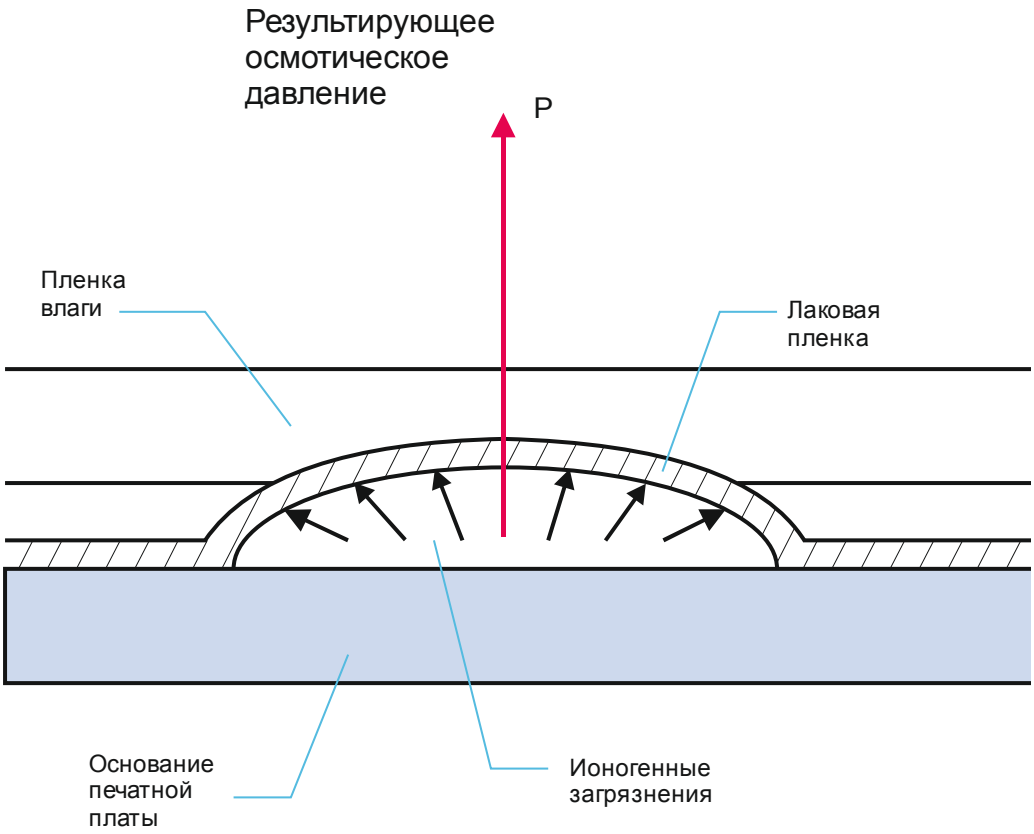


Рис. 53. Схема образования дендрита
в канале, наполненном ионогенными загрязнениями

После образования перемычки кристаллы постепенно утолщаются до 0,1 мм, приобретая отчетливый металлический блеск. Сопротивление таких кристаллов может доходить до 1 Ом. Таким образом, происходит выход из строя изоляции между печатными проводниками.

Скорость образования проводящих перемычек определяется материалом проводников, относительной влажностью среды, смачиваемостью, водо- и влагостойкостью изоляции, величиной напряжения.

Для металлических деталей РЭА характерна атмосферная коррозия, протекающая под тонкой пленкой влаги на поверхности изделия в присутствии кислорода воздуха.

С увеличением влажности или температуры процесс коррозии ускоряется. Обычно коррозия оказывает самое сильное разрушающее действие при часто повторяющейся конденсации в сочетании с повторным испарением.

Наличие посторонних веществ на металлических поверхностях, например, остатков флюса, других остатков производственных процессов – грязи, отпечатков пальцев и т.п., может вызвать или ускорить коррозию при наличии влажности.

Наиболее опасные условия коррозии создаются в присутствии сернистого газа, концентрация которого значительна в атмосфере промышленных городов и жилых помещений. Сернистый газ, растворяясь в пленке влаги, повышает ее кислотность и электропроводность и тем самым ускоряет коррозию.

Плесневые грибки не имеют хлорофилла и поэтому используют органические вещества, на которых происходит их рост. Плесневые грибки содержат большое количество ферментов, которые катализируют процессы разложения. Помимо питательных веществ для развития грибков нужна влага, так как грибковые нити не имеют защиты от испарения. Влага не обязательно должна быть в виде жидкости. Достаточно, чтобы влажность воздуха была 70–100 %, во всяком случае, не ниже 65 %. При предельной влажности 65–70 % могут развиваться только отдельные виды грибков. Температура для роста грибков не играет существенной роли, свет, особенно ультрафиолетовая и инфракрасная части спектра, сильно тормозят их развитие. Способствует росту грибков неподвижность воздуха. Мицелий плесневого грибка состоит из воды с высоким содержанием белка и питательных солей. По нему может происходить закорачивание электрической цепи. Кроме того, органические кислоты, входящие в такой электролит, ускоряют коррозию токонесущих участков (рис. 54).

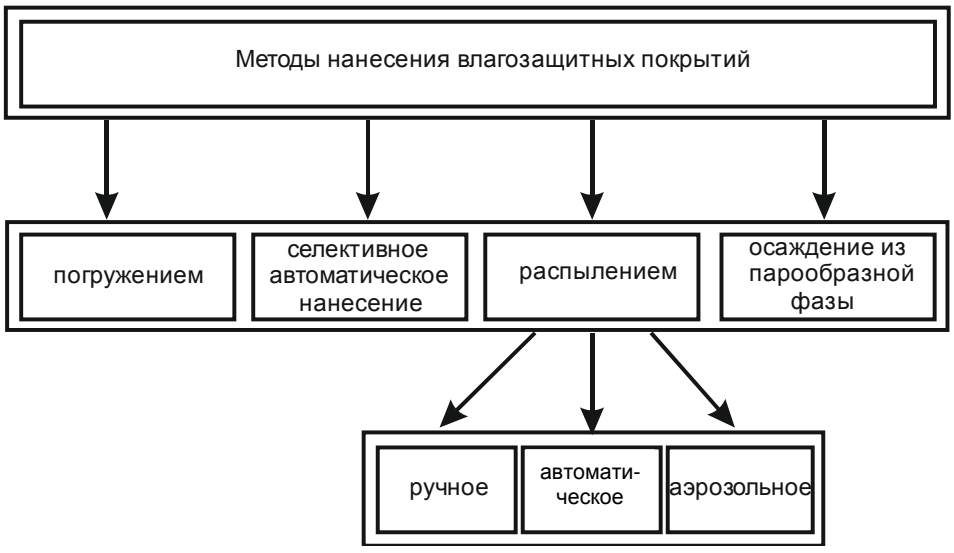


Рис. 54. Влияние климатических факторов
на деградационные процессы аппаратуры

С учетом функционального назначения аппаратуры (бытовая, промышленная, военного назначения), продолжительности и характера воздействия окружающей среды (влага, агрессивные газы, радиация, тепло) выбирается соответствующий вид влагозащитного покрытия печатных узлов. Влагозащитными покрытиями называют полимерные покрытия печатного узла с целью защиты его от влаги, агрессивных сред, перепадов температуры, механических воздействий. Толщина влагозащитных покрытий составляет 25–75 мкм.

Жизнеспособность материала влагозащитного покрытия – это период времени после приготовления, в течение которого материал еще может быть эффективно нанесен до начала его затвердевания. Это важный фактор при планировании операции покрытия, так как влияет на стоимость и объемы нанесения.

Приемлемой считается жизнеспособность смеси от 30 мин до 3 ч при комнатной температуре. Низкая жизнеспособность неизбежно приведет к излишней потере материала во время нанесения и может приводить к неоднородной толщине покрытия вследствие быстрого загустевания материала. Низкая жизнеспособность – недостаток многих прежних двухкомпонентных составов. Современные однокомпонентные покрытия имеют увеличенную жизнеспособность, иногда равную сроку хранения материала.

Срок хранения определяется временем, в течение которого материал может находиться при заданной температуре в оригинальной нераспечатанной упаковке без явного ухудшения своих свойств.

В большинстве случаев наиболее технологичны составы с низкой вязкостью (менее 3000 сПз), позволяющей жидкому покрытию легко растекаться вокруг компонентов во время нанесения и заполнять пространства под компонентами.

Однако при покрытии компонентов с острыми углами или выступающими выводами желательна высокая вязкость материала.

Вязкость должна быть достаточной, чтобы обеспечить галтель на границе компонента и платы, где не может быть обеспечено полное проникновение покрытия под компонент.

Материал покрытия должен иметь оптимальную или близкую к оптимальной вязкость для данной конкретной задачи.

Это минимизирует или даже устранит потребность разбавления, а следовательно, и дополнительные затраты труда.

Твердая составляющая представляет собой часть материала покрытия, из которого будет сформирована влагозащитная пленка после отверждения. Покрытия обычно поставляются в виде жидкости, представляющей собой раствор материала покрытия. При этом после нанесения растворитель испаряется. В последнее время наблюдается тенденция к переходу на материалы на водной основе, где в качестве растворителя используется вода.

Содержание твердой составляющей может лежать в пределах 15–45 %. Но существуют материалы, состоящие из чистого покрытия без растворителя.

Содержание твердой составляющей влияет на толщину слоя покрытия, наносимого за один проход, и соответственно, на количество материала, требующегося для достижения требуемой толщины покрытия.

Процесс отверждения материала влагозащитного покрытия состоит из нескольких этапов.

На первом этапе материал покрытия теряет способность к растеканию и не прилипает при прикосновении. Этот этап должен быть минимальным по продолжительности для уменьшения оттока покрытия с острых ребер компонентов и выводов.

На втором этапе покрытие можно трогать без повреждения, что облегчает транспортировку и упаковку изделия.

На стадии полной полимеризации покрытие достигает оптимальных защитных и рабочих характеристик. В конце этой стадии важно убедиться, что покрытие полностью полимеризовалось. Поэтому до выпуска любого печатного узла проводят климатические, эксплуатационные испытания. Также проводят тест на ускоренное старение.

Температура отверждения является важным фактором. Чем выше температура, тем быстрее происходит отверждение.

Очевидно, что отверждение при комнатной температуре требует меньше затрат, чем при повышенной температуре. Обычно при комнатной температуре влагозащитным покрытиям до полной полимеризации требуется до 24 ч.

В печи влагозащитные покрытия могут полимеризоваться за короткий промежуток времени вплоть до 30 с. Быстроотверждающиеся покрытия обычно представляют собой двухкомпонентную систему.

Для массового производства желательно применение самых быстроотверждающихся покрытий. Однако надо иметь в виду, что высокая температура отверждения может привести к повреждению термочувствительных компонентов на плате.

В практике считается, что время второго этапа отверждения не должно превышать 30 мин при комнатной температуре.

Влагозащитное покрытие должно обладать хорошими электроизоляционными свойствами. Эти свойства не должны ухудшаться с изменением температуры и влажности. Кроме того, покрытие не должно отрицательно влиять на характеристики электрической схемы. Например, некоторые покрытия при низких частотах не влияют на работоспособность схемы, но приводят к отказу схемы на частотах выше 10 кГц. Диэлекрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь возрастают, тогда как сопротивление и электрическая прочность диэлектрика уменьшаются. Повышение тангенса угла диэлектрических потерь означает увеличение потерь полезной энергии и связанный с этим нагрев аппаратуры. Добротность колебательных контуров обычно уменьшается при увеличении частоты и толщины покрытия.

Поглощение влаги покрытием, как из воздуха, так и из водяной пленки на поверхности печатного узла, влечет за собой уменьшение удельного объемного сопротивления, а также увеличение поверхностных токов. Следовательно, покрытия должны иметь низкие показатели влагопроницаемости и влагопоглощения.

Влагозащитное покрытие должно быть электрохимически совместимым с материалом печатного узла, компонентами и химическими соединениями, оставшимися на плате в результате выполнения предыдущих технологических операций. Они не должны разъедать корпуса компонентов и удалять с них маркировку. Некоторые химические соединения могут влиять на адгезию влагозащитного покрытия с платой, препятствовать отверждению покрытия или замедлять его. Перед применением покрытия настоятельно рекомендуется провести испытания на совместимость покрытия и материала платы. Кроме этого, рекомендуется провести испытания поверхностного сопротивления изоляции (SIR-Test) конечного продукта. Этот тест позволит выяснить, существует ли электрохимическое взаимодействие между покрытием и различными химическими соединениями – паяльной маской, клеем, остатками флюса, промывочной жидкостью.

Большинство материалов влагозащитных покрытий обладает весьма высокой устойчивостью в различных химически агрессивных средах. Однако если печатный узел будет подвергаться продолжительному воздействию агрессивных химических соединений, таких как углеводороды, необходимый уровень защиты могут обеспечить только покрытия на основе эпоксидных смол.

Влагозащитное покрытие должно обеспечивать определенную ударную вязкость и устойчивость к истиранию. Покрытие должно быть максимально эластичным, иначе самая хорошая адгезия покрытия к плате не убережет его от отслоения.

В ряде случаев бывает необходимо полностью или частично удалить влагозащитное покрытие с печатного узла, для того чтобы извлечь вышедший из строя элемент с целью его ремонта или замены. Поэтому покрытия должны легко удаляться с помощью растворителей или механически.

После завершения ремонта необходимо тщательно очистить место вскрытия влагозащитного покрытия. Затем заново нанести покрытие и высушить его. При этом материалы, используемые для восстановления покрытия, должны быть того же типа, что и первоначальное покрытие.

Покрытия должны выдерживать локальные температурные нагрузки, вызываемые рассеиваемой компонентами мощностью, без видимых ухудшений своих свойств.

При повышении температуры покрытия должны сохранять хорошие диэлектрические свойства.

Длительное воздействие высоких температур может привести к изменению цвета покрытия, растрескиванию, усыханию, а также снижению электрической прочности покрытия.

Неорганические покрытия не являются питательной средой для плесневых грибков, однако некоторые органические покрытие сильно плесневеют. Для предотвращения плесневения в покрытия добавляются противогрибковые добавки – фунгициды.

Появление плесени на материалах, которые, казалось бы, не могут плесневеть, связано с загрязнением поверхности. Тонкий слой загрязнения от пота рук или от пыли достаточен для роста плесневых грибков.

Акриловые влагозащитные покрытия быстро полимеризуются (достигают оптимальных физических параметров через несколько минут), устойчивы к плесневым грибкам и обладают длительным

временем жизни в ванне. Кроме того, во время нанесения акриловые покрытия не выделяют или почти не выделяют тепла (выделение тепла представляет угрозу для теплочувствительных компонентов), не дают усадку (явление местного чрезмерного механического напряжения на компоненты и паяные соединения).

Из всего многообразия влагозащитных покрытий, предлагаемых на рынке, акриловые характеризуются наибольшей влагостойкостью. Они также обладают сравнительно высокими диэлектрическими характеристиками, выборочной химической стойкостью и хорошей термоустойчивостью.

Акриловые покрытия легко наносить. Во время ремонта их можно легко удалить специальным раствором или паять непосредственно через покрытие при местном ремонте.

Полиуретановые (уретановые) покрытия обеспечивают отличную химическую стойкость в сочетании с хорошими показателями влагопоглощения, диэлектрическими и температурными характеристиками.

Однако высокая стойкость к химическому воздействию является причиной того, что эти покрытия очень трудно удалять при ремонте.

При ремонте или замене элемента должен быть применен специальный компаунд. Но этот компаунд оставляет загрязнения, которые могут ухудшить характеристики узла и его надежность, а также адгезию нового покрытия. Поэтому после применения компаунда печатный узел необходимо тщательно отмыть.

При ремонте можно паять сквозь покрытие. В этом случае образуется буроватый остаток, который обычно не ухудшает характеристик платы, а лишь наносит вред ее внешнему виду.

Полиуретановые покрытия обычно выпускаются в виде одно- или двухкомпонентного состава.

Чистый (однокомпонентный) полиуретан легко применять. Однако до полной его полимеризации иногда требуется 3–10 дней при комнатной температуре. С другой стороны, двухкомпонентный состав достигает оптимальных свойств при повышенной температуре за 1–3 ч, но имеет время жизни от 30 мин до 3 ч.

Покрытия на основе эпоксидных смол обеспечивают отличную устойчивость к механическим воздействиям (устойчивость к истиранию) и химическую стойкость, но обладают слабыми диэлектрическими характеристиками и влагоустойчивостью.

Эпоксидные покрытия практически невозможно удалить во время ремонта, так как сама плата, корпуса компонентов также состоят из материалов на основе эпоксидных смол и могут подвергнуться агрессивному воздействию со стороны очищающих жидкостей.

Эффективным методом ремонта платы или замены компонента является прожигание эпоксидного слоя паяльником или удаление его ножом.

При применении большинства эпоксидов следует применять «амортизирующие» материалы вокруг хрупких элементов платы, чтобы предотвратить их поломку вследствие усадки во время полимеризации.

Время полимеризации – среднее. Отверждение эпоксидного покрытия происходит в течение 1–3 ч при повышенной температуре или 4–7 дней при комнатной температуре.

Недолговечность материала накладывает ограничения на его эффективное использование.

Силиконовые покрытия обеспечивают высокие температурные, диэлектрические показатели и влагоустойчивость, но обладают ограниченной химической стойкостью.

Очень малое поверхностное натяжение обеспечивает проникновение во все участки печатного узла.

Главное достоинство силиконовых покрытий – в высокой термоустойчивости вплоть до 200 °С. Их применение желательно при наличии на печатных узлах тепловыделяющих компонентов, таких как мощные резисторы.

Наряду с эпоксидными силиконовые покрытия могут вызвать трудности при ремонте, и они несколько дороже по сравнению с другими типами влагозащитных покрытий.

Следует отметить, что силиконовые покрытия не идеальны. Так, их режим работы в условно влажной среде, как правило, в 10–20 раз хуже по сравнению с другими покрытиями.

Однокомпонентное силиконовое покрытие для полимеризации обычно требует наличия свободного гидроксильного радикала. Это значит, что оно не будет отверждаться в совершенно сухой атмосфере. В этом состоянии до отверждения он гигроскопичен. После отверждения гигроскопичность снижается, но вследствие пористости материала захваченная им влага не испаряется.

Двухкомпонентные силиконовые покрытия используют другие механизмы отверждения, поэтому они менее гигроскопичны до отверждения. Тем не менее они практически также пористы.

Любая незаполненная покрытием полость, особенно в комбинации с остатками флюса или другими гидрофильными загрязнениями, при эксплуатации во влажной среде может быть заполнена водой.

Помимо этого, силикон имеет очень большой термический коэффициент расширения (ТКР) (например 300–350 ppm/°C) по сравнению с припоем (16 ppm/° C).

Кроме того, силиконы обладают еще одной уникальной особенностью. Будучи очень мягкими на ощупь, они приобретают высокую твердость при воздействии ударной нагрузки.

Следует также отметить, что силиконы классифицируют как VOC (VolatileOrganicCompounds) по законодательству Европейского сообщества (табл. 26).

Таблица 26

Сравнение характеристик материалов влагозащитных покрытий

Характеристики	Акрилы (AR)	Полиуретан (UR)	Эпоксид (ER)	Силикон (SR)
Влагостойкость	Отличная	Отличная	Хорошая	Отличная
Влагостойкость (длительный период)	Хорошая	Отличная	Удовлетворит.	Хорошая
Сопротивление истиранию	Удовлетворит.	Хорошее	Отличное	Хорошее
Механическая прочность	Удовлетворит.	Отличная	Отличная	Хорошая
Термоустойчивость	Хорошая	Удовлетворит.	Удовлетворит.	Отличная
Кислотостойкость	Хорошая	Отличная	Отличная	Хорошая
Щелочестойкость	Удовлетворит.	Отличная	Отличная	Хорошая
Устойчивость к органическим растворителям	Плохая	Отличная	Отличная	Хорошая
Диэлектрическая проницаемость 23eC, 1 МГц	2,2–3,2	4,2–5,2	3,3–4,0	2,6–2,7
Ремонтопригодность	Плохая	Плохая	Плохая	Хорошая

Используемые традиционно эпоксидные, силиконовые, уретановые покрытия, получаемые из жидкой фазы, не могут обеспечить защиту микросхем с малым шагом выводов и тем более микросхем в корпусах BCA.

Наиболее изученными и полностью обеспечивающими защиту от климатических воздействий и агрессивных сред для электронной аппаратуры являются полипараксилиленовые покрытия, получаемые вакуумпиролитической полимеризацией из цикло-ди-*n*-ксилиленов. Получаемое при этом покрытие имеет название «Парилен».

Особенности полипараксилиленового покрытия:

- хорошая проникающая способность и равномерность покрытия, в том числе под компонентами, на местах паек, выводах и т.п.;
- высокая адгезия к различным материалам;
- хорошие электроизоляционные свойства;
- низкая влаго- и газопроницаемость;
- устойчивость к химическим воздействиям;
- высокая эластичность;
- отсутствие значительного влияния покрытия на тепловые режимы работы аппаратуры за счет малой толщины (7–12 мкм) и удовлетворительной теплопроводности полимерной пленки;
- отсутствие внутренних напряжений;
- контролируемая толщина покрытия;
- хорошая ремонтопригодность изделий.

Недостатки:

- неустойчивость покрытия к длительному воздействию ультрафиолета;
- ограничения на типы используемых компонентов, вызванные высокой проникающей способностью покрытия (компоненты должны быть в герметичных корпусах и выдерживать воздействие вакуума).

Производится тщательная многостадийная отмывка модулей от остатков паяльных материалов и других загрязнений.

Выполняется герметизация компонентов в негерметичных корпусах, а также защита контактов разъемов от проникновения полимера.

Модули закрепляются на специальных барабанах и помещаются в камеру осаждения.

Нанесение полипараксилиленового покрытия происходит на специальных вакуумных установках.

Исходный продукт дипараксилилен (димер) или его хлорзамещенные производные возгоняются в вакууме при температуре 120–200 °С и давлении ~ 0,1 мм рт. ст.

Пары димера попадают в камеру пиролиза, где происходит его разложение на активный мономер.

Конечная стадия процесса происходит в камере осаждения, где активный мономер конденсируется на поверхности изделия, при температуре окружающей среды превращаясь в твердый мономер без образования жидкой промежуточной фазы. Толщина покрытия регулируется в широких пределах изменением технологических режимов.

После нанесения покрытия производится тщательный контроль его качества с использованием систем визуального контроля.

Качество исходного материала и полученной пленки контролируется с использованием спектрофотометрической лаборатории.

Эффективность влагозащитных покрытий в некоторой степени зависит от метода нанесения, который в свою очередь влияет на тип применяемого покрытия (некоторые поставщики предлагают специальные версии одних и тех же покрытий для различных методов нанесения).

В основном существует четыре основных метода нанесения влагозащитного покрытия: погружением, селективное нанесение автоматом, распыление и нанесение кистью.

Погружение печатного узла в ванну с материалом влагозащитного покрытия – наиболее эффективный метод нанесения. Однако в этом случае требуется, чтобы конструкция печатного узла предусматривала возможность нанесения этим методом. Компоненты, на которые не наносится влагозащитное покрытие (разъемы, потенциометры, предохранители и т.д.), должны быть сгруппированы на одном участке печатного узла. В противном случае эти участки подлежат маскированию.

Погружение способствует хорошему проникновению покрытия под компоненты и полному обволакиванию труднодоступных мест. Сложные поверхности и формы (такие как кубические элементы) могут быть эффективно покрыты только методом погружения.

Вертикальное погружение печатного узла в ванну гарантирует равномерность покрытия. Основными факторами, влияющими на

качество покрытия погружением, являются скорости погружения и извлечения печатного узла из ванны. Обычно рекомендуется погружение со скоростью 15–30 см/мин. Такой скорости достаточно для удаления воздуха из-под корпусов компонентов и избегания образования воздушных пузырей. Это особенно важно при покрытии печатных узлов с компонентами поверхностного монтажа. Печатный узел должен быть извлечен из ванны после того, как полностью прекратится выделение пузырьков. Для образования равномерной пленки скорость извлечения должна быть ниже, чем скорость стекания материала влагозащитного покрытия в ванну (обычно 2,5–15 см/мин). Однако следует иметь в виду, что понижение скорости извлечения приведет к уменьшению толщины покрытия.

Для достижения лучших результатов температура материала в ванне должна поддерживаться на уровне 20–30 °С.

При нанесении влагозащитного покрытия погружением относительная влажность окружающей среды не должна превышать 65 %. В противном случае могут образоваться точечные дефекты, помутнение и ухудшение структуры поверхности.

Испарение растворителя из ванны увеличивает вязкость материала влагозащитного покрытия. Поэтому вязкость нужно постоянно контролировать и при необходимости добавлять растворитель. Однако потери растворителя в случае погружения меньше, чем при других методах нанесения.

Чтобы обеспечить оптимальную безопасность оператора машины, установки нанесения влагозащитных покрытий снабжаются аргоновыми газовыми ножами, устанавливаемыми над поверхностью материала покрытия в ванной. Подача аргона позволяет:

- снизить потери растворителя;
- исключить образование пленки на поверхности ванны из-за контакта материала покрытия с воздухом.

Ванна также снабжается стационарным насосом перекачки для лучшей повторяемости результатов и постоянного контроля за уровнем погружения.

Наиболее популярный современный метод нанесения влагозащитных покрытий – селективное автоматизированное нанесение.

Высокоточное автоматическое оборудование выборочно наносит покрытие на печатный узел, который загружается в автомат вручную либо по конвейеру. Конвейер встраивается в оборудование для использования его в поточной линии.

Преимуществами селективного автоматизированного нанесения являются относительно высокая производительность, экономичность и возможность использования закрытых (герметичных) камер для предотвращения загрязнения материалов.

Главный недостаток метода – цена. Автоматы селективного нанесения более дорогие по сравнению с другим оборудованием нанесения покрытий.

Метод селективного нанесения покрытия не устраняет необходимость маскирования, а лишь помогает минимизировать его.

Некоторые автоматы используют комбинацию двух типов распылителей: игла/насадка (наносит капли материала вокруг компонентов и в труднодоступные зоны печатного узла) и распылитель-пульверизатор (для распыления покрытия на большие участки платы).

Материал, наносимый с помощью дозирующей иглы, имеет форму капель (не распыляется). Однако дозирование – процесс медленный. Существует и еще один недостаток. Большинство дозаторов имеет склонность к капанию, так как клапаны, управляющие процессом дозирования, располагаются далеко от иглы. Капание – неконтролируемый процесс. При этом появляется риск попадания капли на непокрываемые области печатного узла (например, разъемы) или на конвейер, приводя к снижению качества нанесения и загрязнению автомата.

Нанесение из распылителя-пульверизатора имеет свои недостатки. Этот процесс может приводить к образованию избытка материала покрытия на отдельных участках печатного узла. Во время нанесения большинство частиц осаждается в требуемой области, но некоторый процент частиц будет оседать и за ее пределами. В результате получаются неравномерные или неровные края, которые могут быть недопустимыми в некоторых случаях.

Общим правилом при проектировании печатных узлов, подлежащих влагозащите, является установка допуска ±2 мм между покрываемыми и непокрываемыми участками.

Распыление используется в тех случаях, когда конструкция печатных узлов не позволяет наносить влагозащитное покрытие погружением. Обычно это печатные узлы с беспорядочным расположением непокрываемых участков.

Распыление – более дорогой метод, требующий больших затрат времени и маскирования. Несмотря на это, на сегодняшний

день этот метод наиболее распространен в мире. Этот метод нанесения влагозащитного покрытия обеспечивает наиболее привлекательный внешний вид печатного узла.

По сравнению с погружением распыление – более медленный процесс. Кроме того, необходимы дополнительные затраты на организацию обязательной местной вытяжной вентиляции. К тому же можно столкнуться с проблемой образования теневых эффектов и недостаточным проникновением покрытия под корпуса компонентов.

Метод распыления может быть разделен на три альтернативных метода:

- автоматическое распыление;
- ручное распыление;
- аэрозольное распыление.

Нанесение покрытия с помощью автоматов более эффективно по сравнению с любыми ручными методами, которым свойственны невысокая точность и низкая повторяемость. Использование автоматизированного оборудования имеет смысл, если объемы производства достигают 350–700 плат/ч.

Автоматы наносят покрытие через совокупность дозирующих игл и распылительных головок по одной из стандартных программ или программе, составленной пользователем.

Все методы распыления обеспечивают лучший результат, когда печатный узел находится в горизонтальном положении. Благодаря этому:

- исключается образование подтеков и скопление излишнего материала на границах компонентов;
- исключается эффект затенения.

Автоматическая система фирмы Concoat, встраиваемая в линию, оборудована специальным конвейером с регулируемой скоростью от 5 до 30 см/мин. Печатный узел загружается на конвейер и автоматически подается в распылительную камеру. Распылительная камера снабжена четырьмя распылительными головками, расположенными под углом для эффективного объемного нанесения. Головки смонтированы на раме, совершающей возвратно-поступательное движение посредством шарико-винтовых пар.

Распылительная камера также оборудована системой вентиляции и улавливания избытка материала, а также имеет фильтры.

Сушка материала влагозащитных покрытий производится в специальных инфракрасных и конвекционных зонах.

Эти системы идеально пригодны для малых объемов производства с широкой номенклатурой изделий и обычно на 50 % дешевле, чем автоматы для селективного нанесения.

Это популярный метод нанесения, который применяется при малых объемах производства. Ручное распыление имеет следующие недостатки:

- необходимо два-три нанесения для получения желаемого результата;
- не может быть гарантирована 100 %-я повторяемость;
- теневые эффекты и недостаток покрытия под компонентами;
- безопасность операторов и пожарная безопасность должны быть обеспечены на очень высоком уровне;
- необходимость обеспечения вентиляции рабочей зоны;
- вертикальное распыление горизонтальных поверхностей затруднительно и не рекомендуется;
- процесс нанесения очень медленный и трудоемкий.

Вследствие повышенного содержания растворителя при ручном распылении содержание твердых частиц обычно составляет 15–20 %. Поэтому для получения гарантированной толщины пленки 25–75 мкм требуется два-три нанесения на каждую сторону платы.

Этот метод удобен, но непригоден для массового производства, так как содержание твердой составляющей очень низкое (иногда менее 5 %) по сравнению с методами ручного и автоматизированного нанесения. По этой причине для формирования покрытия требуемой толщины необходимо не менее четырех нанесений.

Применение этого метода не оправдано в массовом производстве. Нанесение кистью очень удобно при ремонте и при обработке опытных образцов.

Важно обратить внимание на то, что чем толще покрытие, тем выше вероятность брака вследствие захвата пузырьков воздуха.

При использовании этого метода рекомендуется использовать кисти со щетиной из натуральных материалов во избежание скопления электростатического заряда. Ручка кисти должна быть не окрашенной, чтобы предотвратить загрязнение покрытия краской.

Дефекты с наибольшей вероятностью могут быть перекрыты при нанесении покрытий в несколько слоев. Каждый метод нанесения имеет свои преимущества и недостатки. Комбинация погружения и распыления дает лучшие результаты, чем любой из методов в отдельности.

Глава 4

Методы выполнения монтажных соединений

4.1. Технология жгутового монтажа

Внутри- и межблочный навесной электромонтаж РЭС выполняется одиночными проводами, экранированными и плоскими кабелями, жгутами и коммутационными жесткими и гибкими платами (печатными, проводными, тканными). Выбор метода монтажа определяется требованиями, предъявляемыми к изготавливаемой аппаратуре, ее сложностью, с учетом величины помех, которую обеспечивает система проложенных проводников.

Монтаж одиночными проводами выполняется обычно путем их прокладки по кратчайшим расстояниям. В результате этого достигаются минимальные паразитные связи между электрическими цепями. Его применяют при изготовлении высокочастотной РЭС. Процесс монтажа выполняется в самом приборе пайкой вручную или накруткой на программированном оборудовании. Он характеризуется большой трудоемкостью и малой производительностью из-за последовательного проведения подготовительных и монтажных операций.

Жгутовой монтаж представляет собой электрическое соединение узлов и блоков РЭС с помощью одиночных изолированных проводов и экранированных кабелей, объединенных в жгут. Это позволяет вести подготовительные операции параллельно со сборкой, использовать автоматизированное оборудование или линии изготовления жгутов, обеспечивать механическую прочность и стабильность параметров при повышенных вибрационных и ударных нагрузках.

Монтаж с помощью коммутационных плат обеспечивает самую высокую производительность и низкую себестоимость, так как выполняется групповыми способами на автоматически работающем оборудовании. Одновременно достигаются высокая плотность соединений, идентичность и стабильность емкости, индуктивности и волнового сопротивления между монтажными элементами, экономия материалов.

При выполнении внутри- и межблочного монтажа должны быть выполнены следующие требования:

- минимальная длина электрических связей и ее стабильность при механических испытаниях;
- высокая помехоустойчивость за счет применения экранирующих оплеток проводов, экранирующих слоев и заземления каждого экрана в отдельности;
- обеспечение надежности и долговечности электрических и механических соединений;
- оголенные участки электромонтажных материалов должны иметь антикоррозионное и технологическое покрытие под пайку;
- соблюдение допустимых расстояний между оголенными участками монтажных проводов и металлическими деталями каркасов; выполнение монтажных соединений, расположенных в непосредственной близости от сильно нагретых деталей, проводами в термостойкой изоляции;
- подключение к каждому контакту не более трех монтажных соединений; возможность доступа к отдельным элементам с целью проведения контроля, настройки и регулировки аппаратуры;
- монтажные элементы не должны располагаться на острых кромках несущих конструкций.

Под термином «проволочный объемный монтаж» понимают электрическое соединение отдельных элементов схемы с помощью кабельных линий. Чаще проволочный объемный монтаж называют жгутовым монтажом.

Жгуты делят на межблочные и внутриблочные, которые в свою очередь бывают как плоскими, так и объемными.

По степени сложности жгуты подразделяют на: простые неразветвленные, простые с одним или несколькими ответвлениями; сложные без замкнутых ветвей, но имеющие на основном стволе или на ответвлениях закрытые участки; сложные с замкнутыми ветвями или замкнутым основным стволом жгута.

Требования к жгутовому монтажу:

- должна обеспечиваться минимальная длина связей;
- необходимо обеспечить надежные электрические и механические контакты и создать максимальные удобства при настройке и ремонте;

- использование разноцветных проводов для упрощения монтажа и особенно для облегчения отыскания неисправностей;
- заземление каждого экрана в отдельности;
- одинаковая плотность монтажа и единообразие внешнего вида монтажа для всех элементов изделия;
- применение ПОС61, ПОС40, ПОС30, ПОС18 (с тем, чтобы обеспечить температуру пайки в пределах 183–227 °С);
- расстояние между оголенными монтажными проводами и металлической поверхностью на менее 5 мм при напряжении более 250 В и более 3 мм для напряжения менее 250 В;
- пересечение высокочастотных электрических цепей, монтируемых неэкранированным проводом должно быть под углом 90°;
- подключать не более 2–3 проводов под один зажимный контакт;
- недопустимость подпайки концов выводов полупроводниковых элементов, конденсаторов и резисторов;
- выбор сечения монтажных проводов в зависимости от проходящего по ним тока;
- жгут не должен лежать на крепежных деталях и затруднять доступ к ним;
- жгут не должен касаться контактных лепестков, выводов и острых ребер деталей;
- жгут не должен затруднять доступ к узлам и деталям для их проверки и замены;
- внутренние радиусы изгиба жгута должны быть не менее 1,5 его диаметра;
- концы проводов должны подходить к элементам их монтажа без натяжения и изломов;
- раскладку начинать с коротких проводов и заканчивать наиболее длинными;
- экранированные провода, не заключенные по всей длине в полихлорвиниловую трубку, помещать в середине жгута;
- в жгуте должно быть два запасных провода, которые укладывают с самого верха на наибольшую длину жгута. Сечение запасных проводов должно быть равным наибольшему сечению проводов в жгуте;

• неэкранированные провода, по которым пропускаются токи высокой частоты, должны быть при параллельном расположении максимально разнесены, а их пересечение следует производить под прямым углом. Экранированные и неэкранированные провода, несущие токи высокой частоты, в общий жгут не связываются;

• в местах прохода жгута через станки в отверстия устанавливают изоляционные втулки, у входа и выхода жгут скрепляют скобами.

При выборе цвета изоляции проводов и их обозначении в схемах рекомендуется следующая цветовая кодировка проводов (рис. 55).

Маркировка проводов

Цвет провода	Шифр		Примечание
	число	буква	
Красный	1	К	Провода, находящиеся под высоким положительным напряжением
Розовый		Р	
Голубой	2	Г	Провода, находящиеся под высоким отрицательным напряжением
Синий		С	
Черный	3	Ч	Провода цепей с нулевым потенциалом относительно корпуса
Фиолетовый		Ф	
Желтый	4	Ж	Провода цепей питания переменным током и цепей накала ЭВП
Оранжевый		О	
Белый	5	Б	Провода, используемые для остальных цепей
Серый		Ср	

Рис. 55. Цветовое кодирование проводов

Применение жгутов обеспечивает высокую механическую прочность и виброустойчивость монтажа, значительно упрощает технологию монтажа.

Раскладку проводов в зависимости от числа выпускаемых изделий выполняют индивидуальным или жгутовым способом.

Применение электрифицированных шаблонов исключает возможность ошибки, облегчает труд монтажника и повышает производительность труда. В последнее время применяют конвейерный способ изготовления жгутов – расположены на тележках и периодически перемещаются от одного рабочего к другому. Этот способ более производителен. Дополнительно оснащены стационарными приспособлениями для снятия изоляции, установкой для лужения, пистолетами для вязки жгутов капроновой нитью и лентой.

Подготовку проводов перед связкой их в жгуты начинают с правки провода, поступающего на завод в бухтах. После этого провод разрезают на заготовки необходимой длины, указанной в технической документации. Способ заготовки монтажных проводов зависит от масштаба производства. В серийном производстве для мерной резки применяют приспособления и станки, значительно повышающие производительность труда и точность этой операции. Резку и очистку концов монтажных проводов в условиях массового производства выполняют на специальном автомате. Способ заделки концов зависит от ряда факторов: марки применяемого провода или кабеля, условий эксплуатации аппаратуры, а также от масштаба производства.

Текстильную, пластиковую и пленочную изоляции удаляют с проводов одним из следующих способов:

- с проводов МГВ, МГВЛ, МГВСЛ, МПТ-20, ТМ-250, ПВМ, МЦСЛ-способом надреза на автомате;
- с проводов МГВ, МГВЛ, БПВЛ, ПВЛ, ПМВ, ПМВГ, МГШВ, МТЛ, МОТ-способом электрообжига на автомате одновременно с мерной резкой заготовок или электрообжигом изоляции на специальном приспособлении, устанавливаемом на столе монтажника;
- с одиночных проводов МГВ, МГВЛ, БПВЛ, БПТ-250, ПВЛ, ПМВ, ЛПЛ, МОТ – специальными щипцами.

Для изготовления жгутов применяют монтажные медные провода с различным типом изоляции: волокнистой из капроновых нитей (МШДЛ, МЭШДЛ, МГШ, МГШД) или стекловолокна (МГСЛ, МГСЛЭ); полихлорвиниловой (ПМВ, МГВ) и волокнисто-полихлорвиниловой (МШВ, МГШВ, БПВЛ). При повышенной температуре (до 250 °С) и влажности используют провода с фторопластовой изоляцией (МГТФ), для аппаратуры, работающей при 70 °С, – провода в шланговой оболочке из морозостойкой резины марок РПД и РПШЭ.

Технологический процесс получения заготовок из проводов с изоляцией из стекловолокна и резины состоит из следующих этапов: резка поступающих проводов на мерные участки, разделка концов (снятие изоляции) и закрепление изоляции, лужение.

Разрезка и снятие изоляции с концов одиночных проводов проводится с использованием универсальных автоматов, приспособлений или вручную. Автоматическое оборудование предназначено для резки монтажных проводов различного сечения длиной 50–1350 мм с одновременным обжигом изоляции по концам на расстоянии 5–10 мм со скоростью 2000 шт./ч.

Плоские провода поступают на сборку в рулонах. Их разрезают на мерные участки, определяемые конструкцией устройства, с помощью гильотинных ножниц. Подача провода осуществляется вручную или специальными механизмами с одновременным выбором размера. При выполнении этой операции должна быть обеспечена перпендикулярность линии реза оси симметрии провода. С обоих концов без повреждения токоведущих жил удаляют изоляционный слой механическими, термомеханическими или химическими методами.

Для механического удаления используют ножи с регулируемым зазором, щетки, резцы для строгания, абразивные круги. Процессы эффективны при обработке проводов во фторопластовой изоляции или термостойкой полиамидной изоляции. Провода с термопластичной изоляцией зачищают термомеханическим способом, при котором нихромовые пластины или подогревные ножи размягчают изоляцию и вдавливаются в нее на определенную глубину по всей ширине. После оплавления изоляция легко снимается механически.

Более эффективной является лазерная обработка остросфокусированным лучом, под действием которого удаляется небольшой участок изоляции. Перемещением ленточного провода относительно луча и поворотом на 180° разрушается изоляция шириной в несколько десятков микрометров по всему периметру. Защита токопроводящих жил от разрушения обеспечивается высокой отражательной способностью покрытий, наносимых на их поверхность. Разработанная для этих целей лазерная установка мощностью 30 Вт работает на углекислом газе и обеспечивает разрушение изоляции со скоростью 0,09–0,35 м/мин. С плетеных и тканых ленточных проводов изоляцию удаляют электрообжигом, предварительно закрепив неудаляемую часть слоем клея БФ-4. Работа с термомеха-

ническим разрушением изоляции сопровождается выделением вредных газов и ее проводят при наличии на рабочих местах приточно-вытяжной вентиляции.

Химическое удаление изоляции целесообразно проводить для тех ленточных проводов, на токоведущие жилы которых наносят гальваническое покрытие. Полиэфирная изоляция удаляется в подогретом до 100 °С растворе серной кислоты, а полиамидная – в растворе едкого натра (температура 110 °С). После обработки производится тщательная отмывка контактируемого с химическими реактивами участка провода. Для защиты токопроводящих жил от окисления и обеспечения хорошей паяемости или свариваемости на их поверхности наносят покрытия из металлов (никеля, золота, серебра) или сплавов (Ag-Sb, Sn-Pb, Sn-Bi).

Для зачистки концов высокочастотных кабелей применяется механизированное оборудование, в котором последовательно удаляются изоляционные и экранирующие слои. Отделение наружного полихлорвинилового покрытия проводится надрезом вращающимся ножом или термомеханической обработкой удаляемой поверхности с помощью двух накладных пластин с острыми ножевыми кромками, выполненными по диаметру токопроводящей жилы. Для извлечения изолированного провода из экранирующей оплетки применяют диэлектрическую иглу с крючком, которая острым концом расширяет жилы оплетки и через образовавшееся отверстие протаскивает провод. Освобожденную от провода часть оплетки подпаивают к корпусному лепестку непосредственно или через отрезок монтажного провода.

После снятия изоляции оголенные концы многожильных проводов скручивают во вращающемся сверлильном патроне, в котором укрепляется втулка с коническим отверстием, а все подготовленные провода поступают на флюсование и облуживание расплавленным припоем ПОС-61. Для предохранения волокнистой изоляции от разлохмачивания ее концы закрепляют нитроклеем, штампованными наконечниками из пластмассы, путем одевания отрезков линоксиновых или полихлорвиниловых трубок, бандажированием нитками.

Применение жгутов придает монтажу высокую механическую прочность и виброустойчивость, упрощает технологию монтажных работ, обеспечивает идентичность монтажа как по конструкции, так и по электрическим параметрам.

Типовая технология изготовления жгутов состоит из следующих операций:

1) подготовка проводов по типу, расцветке, сечению. Отрезка на заданную длину;
2) укладка проводов в требуемом сочетании по шаблону;
3) скрепление проводов вязкой или надеванием оболочки;
4) прозвонка проводов и маркировка;
5) оконцовка проводов;
6) контроль жгута.

Типовой технологический процесс начинается с того, что заготовку проводов начинают с оправки (выравнивании) провода. После этого провод разрезают на заготовки необходимой длины, указанной в технической документации. Марку провода, его сечение и расцветку также определяют по технической документации.

В серийном производстве для мерной резки проводов применяют приспособления и станки, значительно повышающие производительность труда и точность операции.

Резку и зачистку концов монтажных проводов в условиях массового производства выполняют на специальном автомате.

Монтажные провода, прошедшие зачистку, лужение и заделку концов, укладывают на шаблон согласно таблице соединений. Укладку провода начинают с закрепления его на начальной шпильке.

Затем провод прокладывают по схеме жгута, изгибая его на угловых шпильках и закрепляя на конечной шпильке. Начальная и конечная шпильки имеют один и тот же номер.

Когда все провода уложены, их скрепляют непрерывным бандажом из ниток, а для условий повышенной температуры – из стеклянных ниток. Ниточный бандаж можно пропитывать воском (парафином) и закреплять лаком или клеем. Когда жгут используется в эксплуатационных условиях, на которые не рассчитаны провода, входящие в жгут, они могут изготавливаться с оболочкой. Необходимость оболочки возникает при экранировании, в случае высокой температуры, агрессивности среды и т.п. Любая оболочка способствует скреплению проводов в жгуте.

По форме оболочки делятся на трубчатые, ленточные, полосовые и плетенки.

Электрический контроль жгута очень трудоемок. Проверяются целость и соответствие цепей, переходные сопротивления, качество заделки и вибропрочность жгута.

Маркируют жгуты биркой из алюминиевой ленты или хлорвиниловой трубкой. Трубка обычно крепится ниточным бандажом. Маркировка наносится краской. Иногда маркировка гравируется на разъеме жгута.

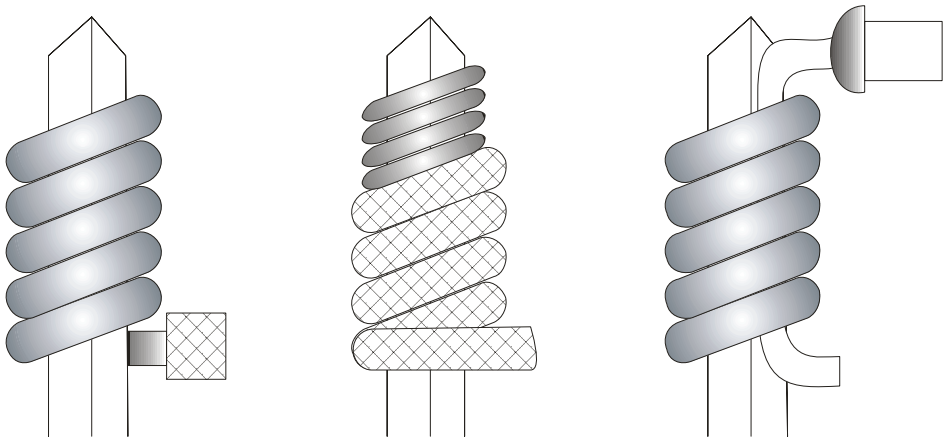
Прозвонка необходима для отыскания вторых концов провода в собранном жгуте, для маркировки и присоединения к штепсельным разъемам, для общей проверки правильности сборки жгута. При большом числе проводов в жгуте прозвонка может быть автоматизирована.

После вязки жгута концы монтажных проводников подвергаются разделке под механическое закрепление и пайку.

4.2. Технология накрутки

Накрутка является разновидностью объемного монтажа, при котором электрическое соединение образовывается при накрутке провода на вывод с острыми кромками без последующей пайки.

При электромонтаже проводов методом накрутки применяется немодифицированное (*а*), модифицированное (*б*) и бандажное (*в*) соединения (рис. 56).



а) *б*) *в*)

Рис. 56. Виды монтажных соединений накруткой:
а – немодифицированное; *б* – модифицированное; *в* – бандажное

Наибольшее распространение имеет модифицированное соединение, обеспечивающее надежную работу аппаратуры в условиях механических воздействий.

Бандажное соединение рекомендуется при монтаже проводов с многопроволочной жилой и присоединении выводов дискретных элементов. Это соединение выполняют проводом без изоляции или медной проволокой, луженной припоем ПОС 61. Число витков бандажного соединения должно быть больше или равно 8.

Накрутка широко применяется для монтажа межблочной, внутриканальной, межканальной коммутации электрических цепей.

Преимущества накрутки по сравнению с пайкой:

- большая надежность соединения (примерно в 10 раз);
- постоянство качества соединения;
- прочность;
- сопротивляемость коррозии;
- чистый металлический контакт между проводом и выводом;
- компактность и возможность миниатюризации;
- отсутствие температурных изменений и источников загорания;
- нет операций флюсования и промывки, характерных для пайки.

Производительность монтажа накруткой выше, чем при пайке, на 250 %.

При монтаже накруткой жила провода должна быть облужена или посеребрена. Без этого диффузия происходит медленнее, а коррозия быстрее, длина участка зачищенной проволоки 20–30 мм.

К выводам, применяемым при монтаже накруткой, предъявляют следующие требования:

- упругость материала;
- коррозионностойкость;
- высокая электропроводность.

Наиболее подходящими под эти требования являются медьсодержащие сплавы, такие как латунь, фосфористые бронзы, никель, серебряные и медно-бериллиевые сплавы.

Форма поперечного сечения выводов может быть квадратной, прямоугольной, треугольной, ромбовидной.

Для обеспечения требуемого переходного сопротивления минимальная площадь поперечного сечения вывода должна быть не

менее площади сечения навиваемого провода. Рекомендуется применять не более трех соединений на одном штырьке.

Во избежание местного перегрева требуется иметь более 24 точек контактирования.

Таким образом, электромонтаж состоит из трех этапов: подготовительного, собственно накрутки, а также контроля.

Первый этап составляют операции получения провода, разъемов и их проверки, нарезки медных перемычек, снятия изоляции.

Второй этап содержит следующие переходы: установка жилы провода в паз наконечника приспособления для накрутки до упора в изоляцию провода; отгибка вручную вставленного провода в прорезь трубки приспособления, насадка приспособления на вывод разъема.

Электромонтаж осуществляют специальным приспособлением – навивочным пистолетом. При вращении наконечника, имеющего соосное и несоосное отверстия, на вывод, входящий в первое отверстие, накручивается провод, вставленный во второе отверстие. Смена одного типа наконечника на другой в зависимости от диаметра соединяемых проводов осуществляется за счет использования цангового зажима.

Контроль накрутки визуальный. При контроле измеряют плотность накрутки (расстояние между соседними витками). Переходное сопротивление – между первым и последним витками, который осуществляют с помощью миллиомметра.

Монтаж накруткой позволяет повысить надежность соединений, производительность труда и не требует использования припоев и флюсов. Монтаж накруткой может быть выполнен вручную или с помощью автоматизированных установок. Отечественная промышленность выпускает установки автоматизированного монтажа УАМ-1 с программным управлением, которые относятся к позиционным станкам с ЧПУ. Установка УАМ-1 позволяет автоматизировать процесс поиска соединяемых проводов и нужного провода, а также осуществляет функцию контроля:

- контроль рабочей операции и правильности соединений концов провода типа «витая пара»;
- индикацию координат штыря для накрутки, номера слоя накрутки, типа и длины отрезка провода и номера операции.

Монтажник при этом выполняет операции заправки провода в инструмент и непосредственной накрутки. Управляющая програм-

ма для УАМ-1 наносится на стандартную перфоленту либо магнитный диск.

Схематично устройство УАМ-1 представлено на рис. 57. Устройство состоит из рамы 1, каретки 2, на которой закрепляется монтируемая модель, инструментодержателя 3, устройства ввода информации с перфоленты 4, устройства ЧПУ 5 и магазина проводов 6.

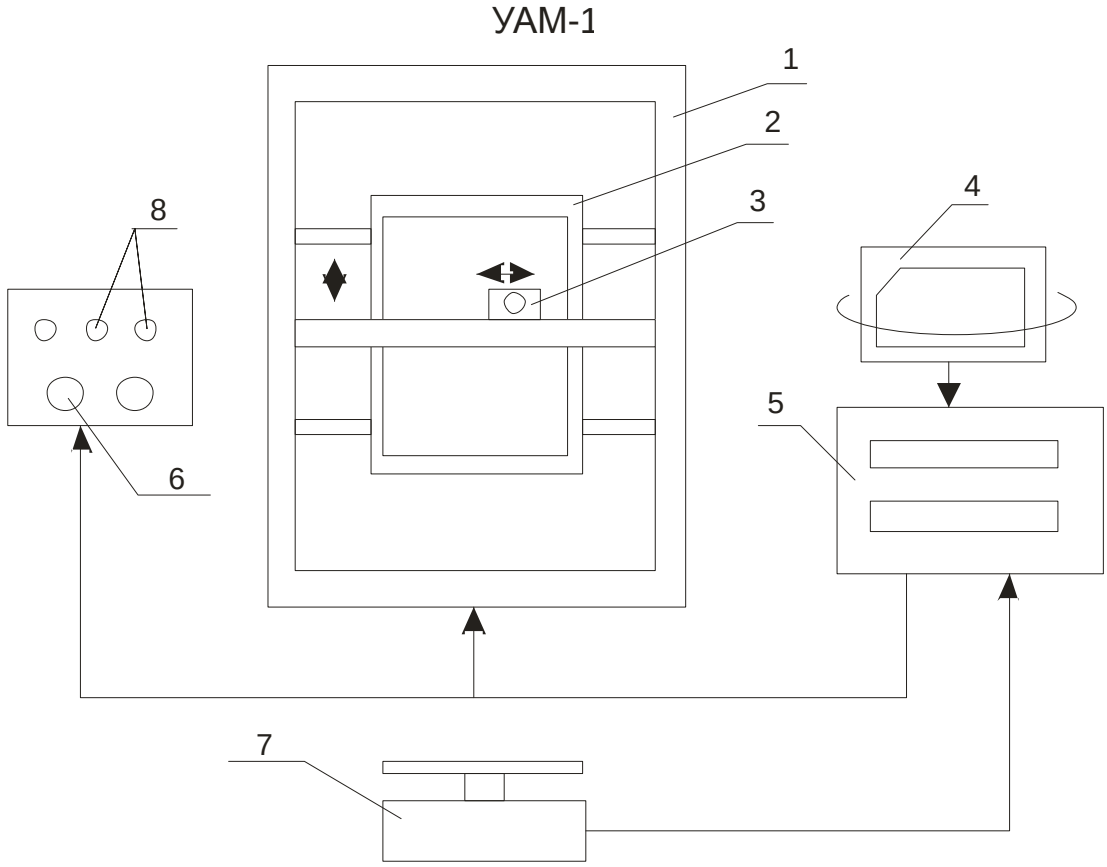


Рис. 57. Устройство УАМ-1

Цикл работы УАМ-1 заключается в следующем:

- путем нажатия педали 7 монтажник посылает в устройство ЧПУ 5 сигнал на считывание очередного кадра информации;
- устройство ввода 4 осуществляет ввод одного кадра управляющей информации;
- устройство ЧПУ 5 преобразует исходный управляющий кадр в последовательность импульсов и выдает их на двигатели, приводящие в движение каретку 2 и инструментодержатель 3; величина перемещения каретки и инструментодержателя определяется количеством импульсов; кроме того, устройство ЧПУ выдает

сигнал на соответствующую лампу индикации 6. Каретка и инструментодержатель останавливаются таким образом, что штырь, на который необходимо провести накрутку, оказывается в центре отверстия инструментодержателя;

• монтажник берет провод из панели магазина 6, около которого горит лампочка, заправляет его в наконечник пистолета для накрутки, вставляет наконечник пистолета в отверстие инструментодержателя и выполняет накрутку.

После этого монтажник нажимает ножную педаль для того, чтобы можно было выполнить накрутку второго конца провода. Затем цикл повторяется.

4.3. Пайка монтажных соединений

4.3.1. Пайка: определение, физическая сущность процесса

Пайка – процесс соединения металлических частей изделия с помощью специального сплава – припоя. Она несколько напоминает сварку металлов, но при сварке соединяемые детали нагреваются до плавления, а при пайке нагревают припой и детали только до температуры плавления припоя. Расплавленный припой затекает в зазоры между деталями изделия под действием капиллярных сил, и чем меньше зазор между соединяемыми поверхностями при пайке, тем лучше проникает в зазор припой под их действием. Для образования качественного паяного соединения необходимо, чтобы жидкий припой хорошо смачивал поверхность основного металла и обеспечивал хорошее прилипание, т.е.:

1) подготовить поверхности деталей;

2) активировать соединяемые металлы и припой;

3) обеспечить взаимодействие на границе «основной металл – жидкий припой»;

4) создать условия для кристаллизации жидкой металлической прослойки.

Подготовка включает удаление загрязнений органического и минерального происхождения, оксидных пленок (механическим или химическим способом), а в некоторых случаях – также нанесе-

ние покрытий, улучшающих условия пайки или повышающих прочность и коррозийную стойкость паяных соединений. На алюминий и его сплавы технологические покрытия наносят с применением ультразвуковых колебаний с частотой 16–20 кГц. Для этого используют УЗ-паяльники, которые создают УЗ-колебания в расплаве припоя, нанесенном на основной металл, с помощью магнитострикционного излучателя, прикрепленного к головке, или используют УЗ-ванны, в которых УЗ-колебания передаются расплавленному припою через стенки сосуда при облуживании погружением. При прохождении через жидкости и сплавы металлов УЗ-колебания оказывают на них весьма высокое звуковое давление, в результате которого происходит разрушение поверхности металлов. Возникающее при этом незначительное растягивающее усилие вызывает разрыв в жидкости и образование большого количества мельчайших пузырьков. Нарушение сплошности жидкости при разрежении называется кавитацией. Кавитационные явления, возникающие в расплаве, приводят к разрушению оксидной пленки на поверхности металла и смачиванию его припоем. Основное преимущество УЗ-пайки – возможность ее выполнения без применения флюсов, поэтому отпадает необходимость зачистки детали перед облуживанием, а также промывки места пайки от остатков флюса. Безфлюсовая УЗ-пайка алюминия и его сплавов является важным технологическим процессом, обеспечивающим удовлетворительные механические свойства и коррозийную стойкость паяных соединений.

Для пайки алюминия и его сплавов используют также абразивный паяльник, который состоит из медной втулки с отверстием для абразивного карандаша. На медную втулку намотана нихромовая проволока, образующая с асбестовым изолятором нагреватель паяльника. Абразивный карандаш по весу состоит из 90 % припоя и 10 % асбеста. Для изготовления такого карандаша стружку припоя и асбеста спрессовывают в холодном состоянии в пресс-форме под давлением 100–150 атм.

Осуществляют абразивную пайку следующим образом: соединяемые детали нагревают до $t°$, превышающей на 25–50 °С $t°_{пл}$ припоя, затем путем натирания поверхности абразивным карандашом удаляют окисную пленку. После этого очищенную таким образом поверхность металла покрывают припоем и облуживают. Затем на облуженную поверхность наносят дополнительно небольшое количество припоя, после чего паяемые детали накладывают друг

на друга и притирают для получения более тонкого шва и удаления окисной пленки с поверхности припоя. Прижатые детали после окончания пайки охлаждают до затвердевания припоя.

Абразивная пайка дает возможность соединять детали толщиной от 14 мкм и выше и не требует предварительной подготовки поверхности деталей (кроме протирания ветошью, смоченной бензином или другими растворителями). При паяльных работах, кроме инструмента, служащего для нагрева, применяют шаберы (для удаления с поверхности спаиваемых изделий припоя, окислов и т.д.), напильники (для зачистки до и после пайки), зажимной инструмент: плоскогубцы обыкновенные и зажимные, пассатижи, струбцины, паяльные клещи и т.п. (для закрепления спаиваемых изделий), металлические щетки (для очистки изделий от грязи и ржавчины, а также для удаления излишков припоя после пайки), волосяные кисти (для смазывания флюсом).

Пайка монтажных соединений необходима для обеспечения механически прочного и надежного электрического контакта; выполняют ее мягкими оловянно-свинцовыми припоями.

Пайка представляет собой соединение монтажного проводника или вывода ЭРЭ с контактным элементом расплавленным металлом или сплавом (припоем), который, затвердевая, образует паяное соединение. В процессе пайки происходят взаимное растворение и диффузия основного металла и припоя, что обеспечивает после затвердевания припоя механическую прочность, герметичность, электропроводность и теплопроводность соединения, для взаимного проникновения припоя и основного металла температура нагрева спаиваемых деталей должна быть несколько выше температуры плавления припоя. В отличие от сварки при пайке не происходит плавления основного металла соединяемых деталей, так как температура плавления припоя всегда ниже температуры плавления основного металла.

Спаиваемые детали нагревают в печах, пламени газовой горелки, токами высокой частоты и паяльником. Сейчас все более широкое применение находит пайка нагретым воздухом.

Таким образом, пайкой называется процесс соединения металлов в твердом состоянии путем введения в зазор расплавленного припоя, взаимодействующего с основным металлом и образующего жидкую металлическую прослойку, кристаллизация которой приводит к образованию паяного шва.

Паяные электрические соединения очень широко применяют при монтаже электронной аппаратуры из-за низкого и стабильного электрического сопротивления, универсальности, простоты автоматизации, контроля и ремонта. Однако этому методу присущи и существенные недостатки: высокая стоимость используемых цветных металлов и флюсов, длительное воздействие высоких температур, коррозионная активность остатков флюсов, выделение вредных веществ.

Трудоемкость процессов пайки в производстве РЭС составляет 15–20 % общей трудоемкости. Прогрессирующее усложнение аппаратуры, появление и применение новых функциональных узлов и элементов повышают требования надежности паяных соединений, управляемости и производительности технологических процессов пайки. Микроминиатюризация компонентов РЭС приводит к увеличению плотности паяных соединений с 10–15 (многослойная печатная плата) до 40–50 паек на $см^2$. Исследование и разработка технологий контактных соединений приобретают особую важность, поскольку 50–80 % всех отказов РЭС происходит из-за наличия дефектов в монтажных соединениях.

Необходимо шире внедрять малооперационные, малоотходные и безотходные ТП, обеспечивающие высокое качество изделий. Основной тенденцией развития ТП пайки является широкое применение групповых методов, использующих современное высокопроизводительное технологическое оборудование, позволяющее механизировать и автоматизировать процессы пайки, управлять качеством паяных соединений.

Структура паяного соединения включает следующие основные элементы: зону сплавления, диффузионные зоны, прикристаллизованные слои и основной металл. В зависимости от соотношения физико-химических свойств основного металла и припоя, а также режима и условий процесса пайки различают следующие виды спаев: бездиффузионный, раствородиффузионный, контактно-реакционный.

Для бездиффузионного спая характерно короткое время контакта расплава с основным металлом, когда процессы гетерогенной диффузии на межфазной границе не развиваются. Спай, возникающий в условиях протекания раствородиффузионных процессов в зоне контакта расплава и основного метала, называется раствородиффузионным. Он может быть образован металлами с неограниченной и ограниченной растворимостью, дающими эвтектические смеси и химические соединения.

Контактно-реакционный спай сопровождается образованием сплава переменного состава на границе с основным металлом, а также прикристаллизованных спаев в процессе кристаллизации.

Пайка осуществляется при температурах ниже точек плавления соединяемых материалов и требует выполнения комплекса физико-химических и технологических условий:

- подготовка поверхности деталей;
- обезжиривание паяемых поверхностей;
- удаление окисных пленок;
- активация паяемых материалов и припоя;
- смачивание паяемых поверхностей расплавом припоя;
- взаимодействие на границе «материал – жидкий припой»;
- кристаллизация жидкой металлической прослойки.

Подготовка паяемых поверхностей металлических деталей, не имеющих покрытий, заключается в очистке их от загрязнений, консервирующей смазки, краски, окалины, следов коррозии и выполняется с применением металлических щеток, галтовки, гидропескоструйной обработки.

Большинство деталей и компонентов РЭС имеет гальваническое покрытие на паяемых поверхностях: золочение, серебрение, покрытия сплавами олово-висмут, олово-свинец, олово-никель, которые защищают поверхности от окисления и облегчают осуществление процесса пайки. Вследствие хранения и естественного старения свойства гальванических покрытий, особенно олово-свинец, олово-висмут и других, ухудшаются, что вызывает трудности при выполнении пайки. Поэтому перед сборкой элементов необходим входной контроль на паяемость выводов компонентов РЭС. Паяемость характеризует возможность образования спая между паяемым материалом и припоем, т.е. способность паяемого материала смачиваться припоем, вступать с ним в физико-химическое взаимодействие и образовывать надежное паяное соединение. Паяемость определяется критериями смачивания и растекания припоя, которые будут рассмотрены ниже. Улучшению способности к пайке обеспечивают такие технологические приемы, как очистка от механических загрязнений (краски, лаков) и удаление жировых и окисных пленок.

Обезжиривание паяемых поверхностей производится с помощью органических или неорганических растворителей. Обезжири-

вание выводов компонентов РЭС с гальваническими покрытиями ведут окунанием, протиркой, струйным методом, промывкой в ультразвуковых ваннах, используя спирто-бензиновую или спирто-фреоновую смеси, уаит-спирит, трихлорэтилен. Для обезжиривания деталей из стали, меди, медных сплавов используют щелочные растворы (10 %-й NaOH) с добавками поверхностно-активных веществ ОП-7,ОП-10 при температуре 343–353 К. После выдержки в ванне в течение 1–30 мин детали тщательно промывают горячей и холодной водой.

Удаление окисных пленок с поверхности металлов перед пайкой производится химическим или электрохимическим способом. При химическом травлении в растворах кислот происходят их взаимодействие с окислами и образование растворимых соединений. При электрохимической обработке деталей на катоде, дополнительно к описанному, происходит восстановление металла выделяющимся водородом. Однако в процессе пайки при нагреве деталей происходят их интенсивное взаимодействие с кислородом воздуха и образование окисных пленок.

Для защиты соединяемых поверхностей и припоя от окисления и удаления образовавшихся при нагреве окисных пленок применяют флюсы, защитные среды, самофлюсующиеся припои. Флюсующее действие специальных растворов или паст проявляется в химическом взаимодействии с окисной пленкой, в результате чего происходит отрыв ее от поверхности металла, растворение во флюсе или перевод в шлам. Необходимо, чтобы флюс имел достаточную жидкотекучесть, не изменяя своего состава, легко удалялся после пайки и не оказывал коррозирующего воздействия на паяемый металл.

Применяемые в технологии РЭС флюсы подразделяются на следующие группы:

- смолосодержащие;
- смолосодержащие активированные;
- активные (кислотные);
- водорастворимые.

Наиболее распространенным представителем смолосодержащего флюса является спирто-канифольный флюс типа ФКСп, содержащий 10–30 % канифоли, растворенной в этиловом спирте. В составе канифоли содержатся абиентиновая кислота $C_{20}H_{30}O_2$ и другие органические кислоты, растворяющие при температуре

500–573 К окислы меди и некоторых других металлов. Флюс характеризуется низкой активностью (1,0 на меди и 0,8 на никеле) и отсутствием коррозионного воздействия.

В смолосодержащие активированные флюсы входят канифоль и кислотный активатор, что повышает их активность до 1,5 единиц, а также несколько усиливает коррозийное воздействие. Поэтому наряду с кислотным активатором (соляно-кислыми анилином, гидразином, кислотой салициловой) во флюсы вводят амины: триэтаноламин и другие, компенсирующие коррозийное действие активаторов. При нагреве активаторы выделяют хлористый водород или кислоту, которые взаимодействуют с окислами основного металла и припоя с образованием легкорастворимых во флюсе хлоридов:

$$MeO + 2HCl = MeCl_2 + H_2O$$

Остатки активированных флюсов после пайки удаляются тщательной промывкой в спирто-бензиновой или спирто-фреоновой смеси. Активные – это флюсы на основе водных растворов солей, например, хлористого цинка или кислот, характеризующиеся высокой активностью и сильным коррозийным воздействием неудаленных остатков, поэтому при пайке РЭС не применяются. Более перспективны для групповых методов пайки водорастворимые флюсы, представляющие спирто-глицериновые смеси с добавками кислотных активаторов, легко удаляющихся после пайки промывкой в горячей проточной воде.

Активация паяемых материалов и припоя необходима для перехода припоя в жидкое состояние, смачивания и растекания его по паяемым поверхностям, взаимодействия припоя с паяемым материалом и сопровождается переносом энергии в форме теплоты. Нагрев материалов и припоя может осуществляться различными источниками энергии, которые определяют способ пайки. Способы нагрева при пайке приведены на рис. 58.

Нагрев паяемых деталей электропаяльником требует тщательного контроля за его термическими характеристиками: температурой паяльного жала, мощностью нагревателя и т.д. Поскольку они наряду с теплоемкостью влияют на скорость восстановления температуры рабочего конца жала, которая задается на 50–100 К выше температуры ликвидуса припоя. Рабочий конец жала должен быть запилен, зачищен и облужен. В процессе пайки происходит эрозия жала вследствие растворения материала паяльного жала – меди в припое. После 700–1000 паек жало теряет форму и нуждается в за-

точке. Стойкость жала паяльника увеличивают путем нанесения гальванического никелевого покрытия толщиной до 100 мкм либо применением порошковых сплавов медь-вольфрам в качестве материала жала.



Рис. 58. Способы нагрева при пайке

Соединение пайкой может классифицироваться по способам нагрева, обеспечению необходимой окружающей среды, способам введения припоя, температуре плавления припоя или его твердости, материалам соединяемых деталей.

Название паек определяется инструментом (оборудованием) или средой, нагревающих место соединения.

Независимо от способа нагрева пайка может производиться в обычной окружающей атмосфере или в специально созданной среде. Поэтому различают способы пайки и по характеру окружающей среды: в вакууме; в среде нейтральных газов; в восстановительной среде.

Стабилизацию температуры рабочего конца жала осуществляют путем закрепления датчика температуры (обычно термопары) в паяльном жале на расстоянии до 30 мм от рабочего конца и ис-

пользования электронного регулятора. Технические характеристики современных паяльников обеспечивают поддержание температуры рабочего конца паяльного жала на заданном уровне с точностью ±20 %. Для процессов групповой пайки более перспективны бесконтактные способы нагрева: токами ВЧ, инфракрасным излучением, лазерным лучом. Индуцированные в металле детали токи ВЧ (150–1000 кГц) протекают главным образом по поверхности, поэтому выделяемая тепловая энергия локализуется в поверхностном слое, толщина которого является глубиной проникновения тока δ:

$$\delta = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}\ , \qquad (36)$$

где f – частота электромагнитных колебаний; ρ – удельное электрическое сопротивление металла; μ – магнитная проницаемость.

Инфракрасное (ИК) излучение с длинами электромагнитных волн $0{,}8\cdot10^{-3}$ – 0,8 мм применяется при пайке в любых условиях: на воздухе, в контролируемых атмосферах, в вакууме; характеризуется точной регулировкой времени и температуры нагрева. В соответствии с законом Стефана–Больцмана плотность полусферического интегрального излучения E определяется как

$$E = \varepsilon C_0\left(\frac{T}{100}\right)^4\ , \qquad (37)$$

где ε – интегральная степень черноты тела; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела – 5,67 Вт/м^{2}К^4; T – температура тела.

Падающее на металлическую поверхность ИК-излучение в основном отражается от его поверхности. С увеличением электропроводности металлов их отражательная способность увеличивается. Лучшими отражателями являются серебро, медь, алюминий, которые используются для изготовления рефлекторов.

В качестве источника ИК-излучения используют галогенные кварцевые лампы мощностью 100–650 Вт для точечных и 1000–5000 Вт для полосковых излучателей. В установках ИК-нагрева применяется оптическая фокусировка излучения ламп или диффузное несфокусированное излучение (рис. 59).

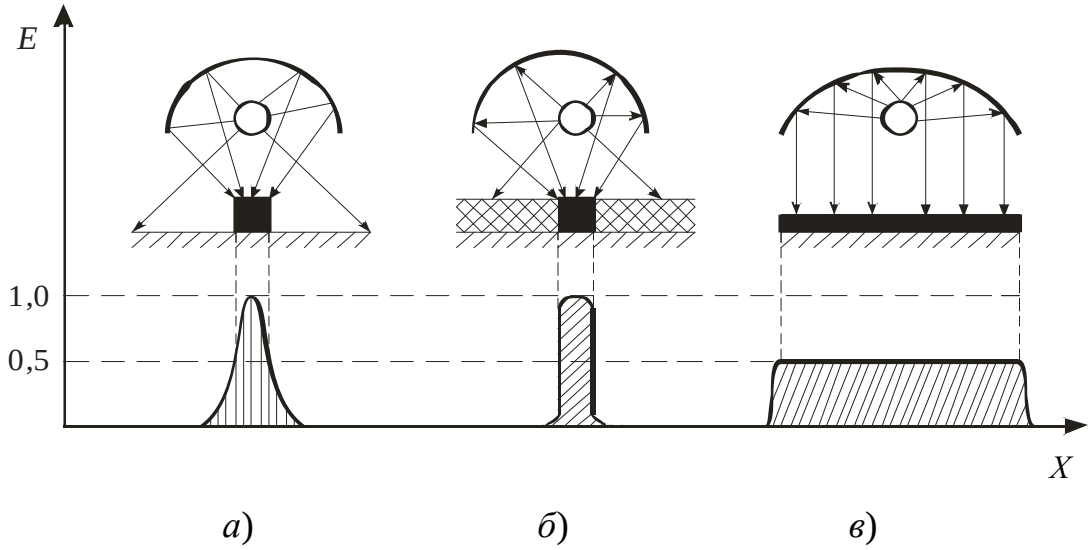


Рис. 59. Способы фокусировки ИК-излучения:
а – оптическая; *б* – оптическая локальная; *в* – диффузионная

Первой стадией физико-химического взаимодействия расплава припоя с паяемым материалом является смачивание, в результате которого две свободные поверхности заменяются одной границей фаз между паяемым материалом и расплавом припоя с более низкой свободной поверхностной энергией системы. Для осуществления смачивания работа сил адгезии расплава к твердой поверхности W_a должна быть больше работы сил когезии, определяемой силами сцепления частиц припоя W_k:

$$W_a - \frac{1}{2} W_k > 0 . \qquad (38)$$

В результате смачивания припой растекается по поверхности паяемого материала до установления равновесия выражаемого соотношением

$$\sigma_{1,3} = \sigma_{2,3} + \sigma_{1,2} \cdot \cos\theta , \qquad (39)$$

где $\sigma_{1,3}$, $\sigma_{1,2}$, $\sigma_{2,3}$ – поверхностные натяжения на границах: твердое тело-газ, жидкость – твердое тело, жидкость-газ соответственно; θ – краевой угол смачивания (рис. 60). Краевой угол смачивания характеризует смачивающую способность припоя и применяется в качестве одного из критериев паяемости. Паяемость металла или покрытия считается плохой, если $\theta > 50°$, удовлетворительной – $20° < \theta < 50°$, хорошей – $\theta \leq 10–20°$, отличной, если $\theta = 1–10°$.

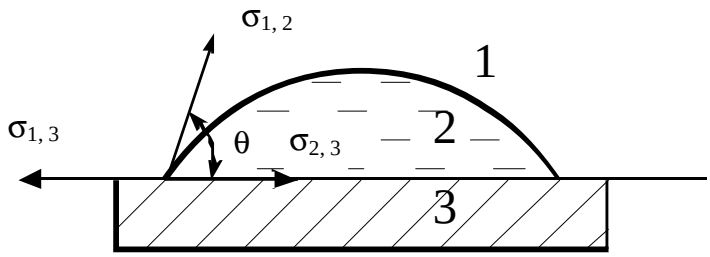


Рис. 60. Схема равновесия сил поверхностного натяжения капли припоя на поверхности твердого тела:
1 – газ; 2 – расплав припоя; 3 – твердое тело

Растекание припоя по поверхности основного металла характеризуется коэффициентом растекания *K*:

$$K = W_a - W_k = \sigma_{1,2}(\cos\theta - 1). \qquad (40)$$

Припой, растекаясь по паяемой поверхности, заполняет зазоры между деталями. Высота поднятия припоя за счет капиллярных сил определяется соотношением

$$h = \frac{2\sigma_{1,2}\cos\theta}{rg\left(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{ф}}\right)}, \qquad (41)$$

где r – радиус капилляра; $\rho_{\text{п}}$, $\rho_{\text{ф}}$ – плотности припоя и флюса соответственно; g – ускорение свободного падения (рис. 61).

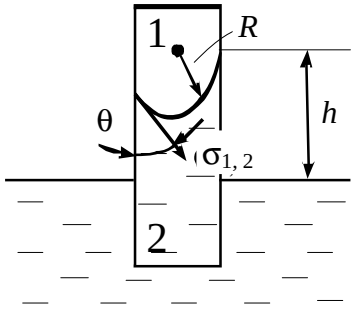


Рис. 61. Подъем припоя за счет капиллярных сил:
1 – газ; 2 – расплав припоя

Взаимодействие основного металла с расплавленным припоем заключается в растворении металла в припое, протекании процессов диффузии. С повышением температуры увеличивается растворимость, причем возрастает избирательное растворение элементов,

входящих в состав основного металла, наблюдается значительное проникновение припоя по границам зерен основного металла, увеличиваются размеры диффузионной зоны. Диффузионные процессы при пайке позволяют увеличить прочность соединений, однако образование интерметаллидных соединений в спае при глубокой взаимной диффузии компонентов вызывает снижение прочности соединений. Максимальная прочность паяных соединений припоем ПОС61 обеспечивается при ширине диффузионной зоны порядка 1,0 мкм.

Заканчивается образование паяного соединения кристаллизацией расплава, которая может происходить как путем достройки отдельных зерен основного металла, так и путем образования новых зерен. На процесс кристаллизации значительное влияние оказывает величина зазора, так как она определяет температурный градиент расплава, а также величину и протяженность области концентрационного переохлаждения. Качество паяных соединений оценивают путем визуального осмотра с помощью бинокулярного микроскопа типа МБС-2, оценкой структуры припоя по специально приготовленным шлифам, оценкой усилия разрыва, вибропрочности и надежности соединений. При визуальном осмотре выявляются такие дефекты, как раковины, трещины, недопаи и перегревы и т.д. Предел прочности на растяжение соединений, выполненных при оптимальных условиях припоем ПОС61, составляет порядка 38 МПа, на срез – 34 МПа.

Рассмотрим более подробно классификацию способов нагрева (см. рис. 58).

Пайка паяльником

Способ пайки паяльником широко используется в производстве радиотехнических изделий, особенно при схемно-монтажных работах.

Прежде всего следует указать, что способ пайки паяльником может быть использован как для последовательной пайки шва, так и для одновременной пайки всего соединения.

В связи с тем, что паяльник не может быть нагрет до высокой температуры (его медный стержень не выдерживает больших температур, а использование других металлов нецелесообразно прежде всего потому, что они обладают меньшей теплоемкостью и теплопроводностью, чем медь), его можно применять только при пайке легкоплавкими припоями.

Количество тепла, которое в короткое время может быть передано от стержня паяльника к месту соединения, зависит от его массы (и теплоемкости). Вес ручного паяльника ограничен, так как при большом весе им трудно пользоваться.

Количество тепла, необходимое для прогрева места соединения, возрастает с увеличением веса деталей. При большом паяльнике время пайки может быть уменьшено, а производительность увеличена, но только до известных пределов, когда уменьшение производительности за счет большого веса паяльника не сводит на нет его преимущество. Для ручной пайки вес паяльника не превышает 0,5 кг.

Одна из важнейших особенностей пайки паяльником состоит в том, что при этом способе возможно производить пайку таких соединений, которые другими способами осуществить трудно. Для различных конструкций изделия, в котором применяются паяные соединения, можно воспользоваться соответствующими формами стержней паяльников. При конструировании радиотехнических изделий не следует злоупотреблять этой возможностью, так как труднодоступная пайка не всегда может быть выполнена достаточно качественно, а контроль ее будет затруднен.

Пайка паяльником используется и для соединения деталей малых размеров, когда по конструктивным соображениям нельзя воспользоваться другими методами.

В процессе пайки паяльником конец его стержня должен скошенным концом касаться места соединения. Во многих случаях стержень паяльника приходится перемещать с некоторым небольшим давлением по соединяемым элементам деталей. Поэтому последние должны быть предварительно хорошо соединены между собой, а соседние детали и узлы не должны мешать подводу тепла от стержня паяльника к месту соединения. В производстве радиотехнических изделий, как правило, используются электропаяльники. Существуют и другие типы паяльников, например с газовым или бензиновым подогревом, обычно применяемых для пайки относительно массивных деталей. При изготовлении радиотехнических изделий детали, соединяемые пайкой, в большинстве случаев имеют малые размеры, поэтому такие паяльники почти не используются.

Электропаяльники, применяемые в радиотехническом производстве, рассчитываются на мощность 20–200 Вт при напряжении

12–24 В. При таком низком напряжении работа с паяльником сравнительно безопасна.

Пайка горелкой

Пайка относительно массивных и крупногабаритных деталей, а также при использовании припоев со сравнительно высокой температурой плавления осуществляется с помощью нагрева газовой горелкой или паяльной лампой. В зависимости от температуры и количества необходимого тепла горячие газы (ацетилен, пропан, бытовой газ и др.) могут гореть в смеси с воздухом, со сжатым воздухом или кислородом. Как известно, пайка горелкой (или несколькими горелками) может быть механизирована и применена для массового производства.

Пайка горелкой может производиться последовательным способом вдоль шва или при одновременном разогреве всего места соединения. Смесь газов с кислородом и воздухом может давать различные величины температур пламени. Наиболее высокую температуру имеет ацетилено-кислородное пламя.

Газовые горелки применяются при пайке конструкционных и малоуглеродистых сталей, меди и никелевых сплавов и свинца. При пайке в пламени газовой горелки алюминия и его сплавов применяют газовые смеси кислорода с водородом, бутаном, пропаном.

Пайка горелками в последнее время используется с газовыми флюсами, вводимыми в горючую смесь из флюсоподателя, последовательно соединенного между баллоном с горючим газом и горелкой. В качестве газовых флюсов применяют раствор метилбората в метиловом спирте с ацетоном (например, флюс БМ-1). Газовые флюсы применяются для пайки меди, латуней и углеродистых сталей. Они непригодны при пайке нержавеющих сталей и при пайке серебряными припоями.

В процессе пайки соединяемые детали нагреваются до высокой температуры, что исключает возможность близкого расположения к месту шва деталей из органических диэлектриков или из других нетеплостойких материалов. Большие нагревы при больших перепадах температур могут привести к заметным короблениям элементов конструкции. Это особенно сильно будет проявляться при выполнении замкнутых швов. Часто для предотвращения такого коробления деталей прибегают к специальным зажимным приспособлениям, в которых их паяют и охлаждают. Однако это не устра-

няет деформации полностью. Поэтому при конструировании соединений, рассчитываемых на пайку газовой горелкой, нужно предусмотреть возможность деформаций и их дальнейшее исправление или учесть величину деформации в общей размерной цепи.

Технология пайки горелкой значительно сложнее пайки паяльником. Для производства такой пайки требуется специальное помещение (или отдельный производственный участок) с хорошей вентиляцией и всем необходимым оборудованием. Поэтому наряду с разработкой конструкции изделия следует вести и подготовку надлежащего производственного участка.

Пайка в печи

Пайка в печи находит особенно широкое применение в тех случаях, когда детали можно собрать совместно с припоем, помещаемым непосредственно в соединение или около него. Она дает хорошие результаты при пайке легкоплавкими припоями, когда поверхности соединяемых деталей могут быть облужены обильным количеством припоя и перед помещением в печь плотно механически соединены между собой. Способ пайки в печах относится ко второй группе паек, когда одновременно осуществляется пайка сразу всего соединения.

Особенности пайки в печах состоят в следующем:

- во-первых, изделие в меньшей степени подвержено короблению, поскольку нагрев и охлаждение не являются местными, а все элементы изделия нагреваются одновременно. Однако это исключает возможность использования паяных соединений в узлах с нетеплостойкими деталями и с другими соединениями, например, с клепаными или винтовыми, которые при воздействии тепла могут ослабнуть;
- во-вторых, детали, покрытые гальваническим способом некоторыми материалами, не могут выдержать сравнительно длительного нагрева в печах. Непокрытые металлы могут подвергнуться коррозии (если не применять специальных мер). Поэтому пайку в печах можно использовать для сравнительно ограниченной номенклатуры конструкций;
- в-третьих, однородность получаемых соединений уменьшает разброс по их механическим свойствам.

Пайка в печах, как правило, позволяет получать высокую производительность. Она также дает возможность осуществлять

пайку в восстановительных или нейтральных средах. Использование электрических печей позволяет производить пайку при температуре от 1 000 до 1 300 °С.

При пайке в печах используются припои в виде проволоки, фольги, металлических опилок, порошка, пасты и т.д. Паяемые изделия загружаются в печь партией или подаются к ней непрерывно по конвейеру. Характер загрузки в печь и особенность процесса пайки приводят к необходимости заботиться о достаточно хорошей фиксации взаимного расположения соединяемых деталей, что заставляет прибегать к тугой, прессовой посадке и к скользящей посадке при использовании дополнительных способов фиксации. Тугие посадки применяются при пайке медью. Иногда прессовая посадка с большим натягом приводит к недопустимой деформации деталей в результате растяжения ее в нагретом состоянии выше предела упругости, что приводит к раскрытию и ослаблению паяных швов. В муфтовом соединении простая и плотная посадки могут быть осуществлены при наличии прямой насечки на поверхности одной из деталей.

Если требуется высокая прочность соединения, то перед пайкой целесообразно использовать накатку, керновку, развальцовку, рифление, заклепочные соединения и т.п.

Способ пайки в печи применяется при использовании низких температур, т.е. при легкоплавких припоях. Так, в печах с непрерывной подачей узлов паяют типовые стеклянные изоляторы к крышкам, предназначенные для герметичных корпусов, роторы и статоры подстроечных конденсаторов, в которых части пластин, ось колонки и швеллеры предварительно хорошо лудятся и соединяются между собой тугой посадкой.

В печах с успехом паяются и многие конструкции с керамическими деталями. Возможность строгого соблюдения режима пайки (температуры и времени) позволяет обеспечивать высокую надежность соединения, выполненного в печах.

Если проектируемое соединение рассчитано на массовый выпуск, то конструктору целесообразно принять все меры к тому, чтобы узел можно было выполнять путем пайки в печах. Это позволит увеличить производительность труда, улучшить качество и произвести нормализацию соединяемых деталей.

При конструировании деталей, предназначающихся для пайки в обычных печах при больших температурах, необходимо иметь в

виду, что детали узла могут покрыться после пайки окисной пленкой, которую придется удалять механическим или химическим путем. Поэтому применяемые материалы, размеры и допуски на отдельные элементы конструкции должны выбираться с учетом их возможных изменений.

Пайка при непосредственном разогреве соединяемых деталей электрическим током. Электрический ток может быть использован для разогрева паяемых деталей за счет их контактного сопротивления. Такой способ часто называют электроконтактной пайкой или пайкой сопротивлением.

В этом случае деталь или обе соединяемых детали будут входить в электрическую цепь. Припой в любой удобной форме может предварительно укладываться около соединения или присаживаться вручную с внешней стороны соединения в процессе пайки. При этом следует иметь в виду, что наличие флюса уменьшает электропроводность соединения.

Рассматриваемый способ пайки по используемому оборудованию и технологическим приемам очень во многом напоминает точечную электросварку. По своим особенностям этот способ относится к первой группе.

Для этого вида пайки могут быть использованы как точечные сварочные машины, так и роликовые машины. Кроме того, могут быть использованы и специальные сварочные клещи. Процесс нагрева места соединения и все его особенности аналогичны происходящим при точечной сварке, рассмотренной в гл. 4. Этим способом можно припаивать различные металлы. Особенность рассматриваемого способа пайки состоит в том, что его можно применять только для конструкций, отвечающих требованиям, предъявляемым к соединениям, предназначенным для контактной (шовной или стыковой) электросварки. В отличие от электросварки здесь, кроме медных электродов, могут быть использованы угольные (графитовые) марок ЭГ-2, ЭГ-8 и др., а также из жаростойких сталей и сплавов (ЭИ437, ХЗО, Х17Н25С, Х12М и т.д.).

Применение различных электродов (например, из графита и вольфрама) позволяет осуществлять нагрев металлов с различной теплопроводностью и сопротивлением в труднодоступных местах.

От электросварки рассматриваемый способ пайки отличается расположением электродов. При сложной форме изделия удобно производить пайку, подводя электрический ток к графитовой пла-

стине, на которой устанавливается паяемое изделие, присоединенное к другому проводу электрической цепи. При контакте паяемых частей детали ток проходит через место спая и пластину, нагревая их. Нагрев детали производится главным образом за счет передачи тепла от разогретой током графитовой пластины. Обжим места спая может быть произведен специальными прижимами, не включенными в общую электрическую цепь. Очевидно, что давление с соединения не должно сниматься до тех пор, пока расплавленный припой не затвердеет.

Рассматриваемым способом можно припаивать медь и ее сплавы, стали различных марок, молибден, вольфрам и в отдельных случаях даже титан.

Относительно большие ограничения форм соединяемых деталей и сравнительно небольшая производительность (по сравнению с точечной сваркой) являются препятствием для широкого использования способа пайки за счет контактного сопротивления. Этот способ иногда бывает целесообразен при пайке таких деталей, которые не могут быть успешно сварены контактным способом сварки.

Более перспективным является второй вариант пайки, при котором одна из деталей подвергается нагреву проходящим через нее током. В последнее время этот вариант пайки иногда применяется при соединении деталей некоторых конструкций миниатюрных блоков радиотехнических аппаратов. В этом случае серебряные пазы керамических деталей, представляющие собой выводы отдельных элементов, предварительно хорошо (обильно) облуживаются припоем ПОС-61. Дополнительному облуживанию подвергается и медный луженый провод, который используется для соединения указанных выше выводов деталей. После укладки заготовок проводников в пазы керамических деталей с некоторым небольшим усилием за счет своеобразной тугой посадки к ним подводится напряжение от специального трансформатора, которое и создает в каждом из проводников ток, нагревающий их до требуемой температуры. Время пайки и величину температуры в местах соединения можно регламентировать, применяя для этой цели специальные реле времени и устройства, формирующие импульс тока. Таким способом можно припаивать не только детали микроминиатюрных блоков, но и любые другие детали малых передних размеров, которые могут быть нагреты током.

Пайка индукционным нагревом

Способ пайки индукционным нагревом состоит в том, что при его использовании тепло получается от электрического тока, индуктирующегося непосредственно в подлежащих пайке деталях, поэтому этот способ иногда называют индукционной пайкой. При этом соединяемые детали располагают около или внутри специальных индукторов, питающихся энергией от специальных высокочастотных агрегатов. Точного расчета индукторов не существует, и поэтому приходится экспериментальным путем подбирать как его форму, так и расположение по отношению к паяемому шву. Наиболее удобными (с точки зрения создания местного нагрева) являются петлевые, а не спиральные индукторы. (Все устройство аналогично используемому для нагрева деталей токами высокой частоты.) Припой обычно укладывается у места соединения перед пайкой. Хорошо сконструированное соединение и правильно выполненный индуктор обеспечивают одновременный нагрев всех соединяемых деталей до необходимой температуры.

Рассматриваемый способ пайки относится ко второй группе, но при использовании его для соединения очень больших деталей можно производить и последовательную пайку шва.

Преимущества индукционной пайки состоят в том, что при ней можно обеспечить быстрый нагрев соединения, что способствует уменьшению возможного окисления деталей. Используя индукторы специальной формы, можно обеспечить местный нагрев сравнительно больших площадей. Быстрый и избирательный разогрев только мест соединения позволяет пользоваться этим методом пайки для узлов с изоляционными деталями, которые находятся на таком расстоянии от места соединения, при котором исключается нагрев теплочувствительных деталей за счет теплопроводности.

Индукционная пайка хорошо поддается регулировке, чем обеспечивается определенная стабильность режима. Она может быть приспособлена для непрерывной конвейерной пайки массовых изделии.

Рассматриваемый способ пайки не является универсальным, так как не все геометрические формы конструкций соединений могут им выполняться. Поэтому в практике только конструктор определяет необходимость или возможность применения этого способа пайки. Часто это обусловливается необходимостью более полной загрузки имеющихся на предприятии высокочастотных печей.

Следует иметь в виду, что по сравнению с обычными электрическими печами при высокочастотном нагреве расходуется меньше электрической энергии. Использование высокочастотных печей позволяет при меньшей площади получить больший съем продукции, а процесс пайки легче поддается машинизации и автоматизации.

Обычно для индукционного нагрева металлов используются ламповые плавильно-закалочные высокочастотные генераторы с выходной мощностью 10–60 кВА и частотой 200–600 кГц.

При индукционном нагреве места соединения прежде всего нагреваются внешние поверхности (деталей и припоя), а нагрев у зазора происходит в результате теплопроводности и поэтому более медленно. Применение генераторов мощностью более 30 кВА при пайке не рекомендуется из-за возможности оплавления поверхности детали, раннего расплавления припоя вследствие теплопроводности.

При разработке паяного соединения, предназначаемого для индукционного нагрева, необходимо знать максимальные и минимальные размеры индукторов, которые могут быть применены с имеющимся генератором. Увеличение зазора между индуктором и местом шва уменьшает скорость нагрева. Обычно этот зазор колеблется в пределах от 2 до 20 мм. При пайке тонкостенных деталей удобны небольшие зазоры. Для создания более равномерного нагрева разностенных или сложных изделий и предотвращения оплавления в них выступов и острых кромок пользуются зазорами больше 20 мм.

Пайку в индукторе удобнее всего производить при вертикальном или наклонном положении паяемой поверхности детали. При сложной форме деталей при нагреве их рекомендуется непрерывно вращать со скоростью 20–30 об/мин. В конструкции таких узлов необходимо предусматривать специальное предварительное крепление.

Припой размещается в месте зазора или около него в виде фольги, проволочных колец, порошка, стружки, пасты, зерен и т.п. Обычно припой помещают в верхней части зазора, для чего целесообразно предусмотреть в деталях специальные неглубокие канавки. Подходящими формами соединительных швов (изделий относительно больших размеров) будут круглые и прямоугольные с малым отношением сторон.

Изделия малого размера могут паяться одновременно по нескольку штук одним индуктором. Пайка в спиральных индукторах может одновременно выполняться с деталями различной формы, но производительность ее будет сравнительно небольшой.

Пайка индукционным нагревом может производиться в вакууме или в восстановительной среде. При пайке в восстановительной среде соединяемые детали помещаются в контейнер из нержавеющей стали, стенки и дно которого изолированы от внешней среды. Контейнер нагревают в наружном многовитковом индукторе. При пайке в контейнере, нагреваемом в высокочастотном индукторе, скорость процесса пайки увеличивается в 5–10 раз по сравнению с пайкой в обычных электрических печах с восстановительной средой, так как при нагреве в индукторе прогрев контейнера длится всего несколько минут; для прогрева же печей с восстановительной средой необходимо обычно несколько часов. В крупносерийном и массовом производствах часто используют автоматическую пайку с непрерывной подачей деталей в индуктор.

4.3.2. Факторы, определяющие смачиваемость и паяемость печатных плат

Смачивание основного металла расплавленным припоем и растекание последнего, обеспечивающее хорошую адгезию припоя к основному металлу и их взаимную диффузию, возможно только при отсутствии окисных и жировых пленок, а также других загрязнений на поверхности основного металла. Образование прочного соединения припоя с основным металлом происходит лишь в том случае, если поверхности спаиваемых деталей абсолютно чисты. Для удаления окислов и загрязнений детали перед пайкой зачищают. При этом механически наносят сеть капиллярных канавок, обеспечивающих лучшее смачивание.

Смачиваемость – способность паяемого материала (в нашем случае медной фольги) образовывать с припоем надежный механический и электрический контакт при застывании последнего.

Паяемость – способность конструкций, подвергаемых пайке успешно выдерживать физико-химические нагрузки, возникающие во время и после пайки.

Факторы, влияющие на смачиваемость и паяемость, сведены в рис. 62 и 63 соответственно.

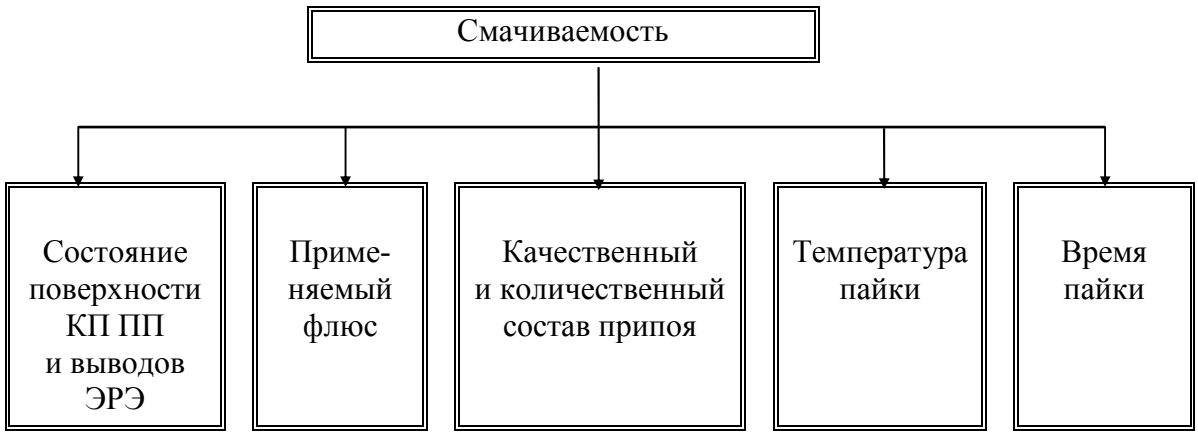


Рис. 62. Факторы, определяющие смачиваемость

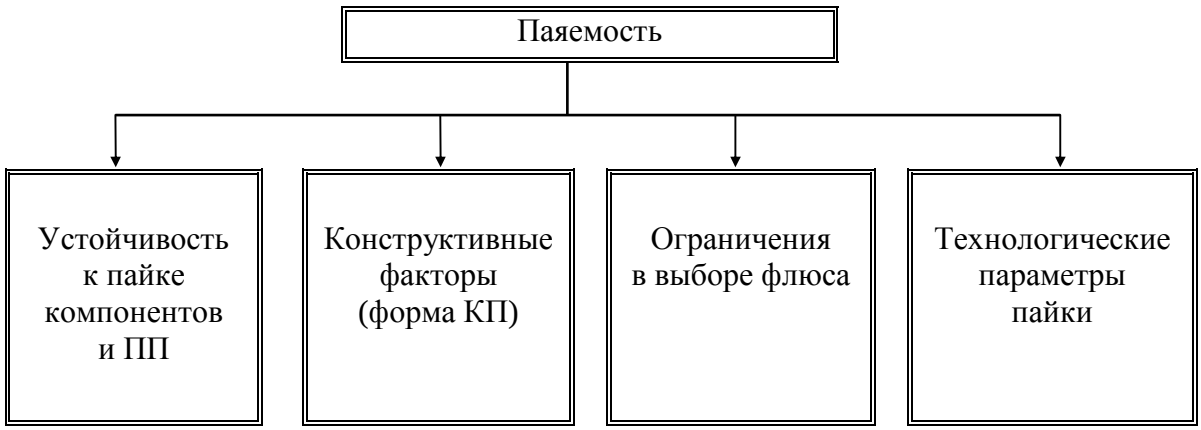


Рис. 63. Факторы, определяющие паяемость

Для защиты поверхностей спаиваемых деталей от интенсивного окисления в результате нагрева место пайки покрывают флюсом, который образует жидкую и газообразную преграду между поверхностями спаиваемых деталей и окружающим воздухом. Флюсы также очищают поверхности спаиваемых деталей от загрязнения, растворяют окисные пленки и способствуют лучшему затеканию расплавленного припоя в зазоры между деталями.

4.3.3. Групповая пайка элементов с радиальными выводами

Групповая пайка может быть осуществлена различными способами. Определяющим в выборе способа пайки является расположение элементов на плате.

При групповой пайке с односторонним расположением навесных ЭРЭ применяется пайка погружением, пайка волной и избирательная пайка (рис. 64).

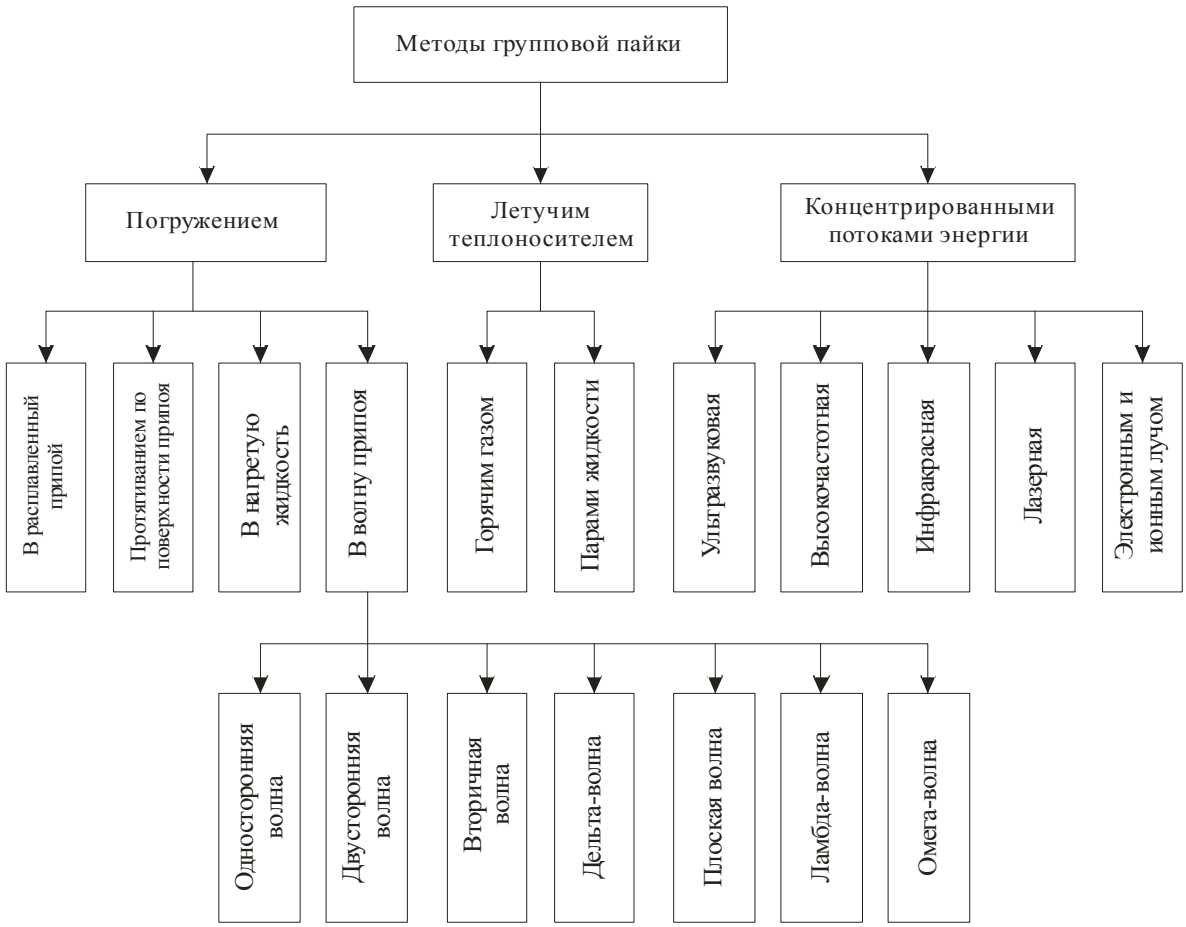


Рис. 64. Классификация методов групповой пайки

При пайке погружением плату с установленными ЭРЭ закрепляют в приспособление, устанавливают на головку-вибратор и погружают в ванну с расплавленным припоем (рис. 65). Глубина погружения 0,5–0,7 толщины печатной платы обеспечивается ходом кронштейна, на котором устанавливается плата, и регулятором уровня припоя с поплавковым датчиком. После 2–3 с выдержки включают вибратор с амплитудой колебаний 0,1–0,3 мм при частоте 100 Гц. Вибрация обеспечивает удаление газов, возникающих при соприкосновении участков платы, покрытых флюсом, с расплавленным припоем, улучшает проникновение припоя в отверстия платы, а также способствует правильному оформлению пайки.

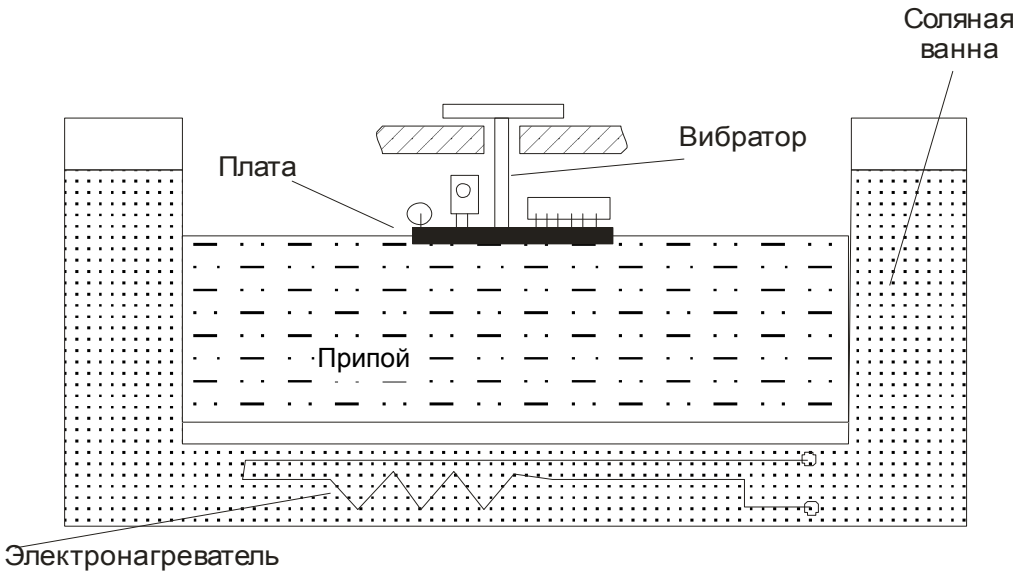


Рис. 65. Групповая пайка погружением

Наиболее совершенным способом реализации пайки погружением является пайка протягиванием, при которой ПП укладывается в держатель под углом около 5°, погружается в ванну и протягивается по зеркалу припоя. Впереди держателя имеется закрепленный скребок, который очищает поверхность зеркала от пленки окислов. Создаются благоприятные условия для удаления флюса и излишков припоя. Время пайки протягиванием увеличивается до 10 с.

Предохранение плат от загрязнения окисной пленкой при пайке погружением достигается либо применением автоматических очистителей зеркала ванны, либо специальной конструкцией кожуха кассеты платы.

Для снижения расхода припоя и уменьшения воздействия тепла плата закрывается защитной маской из лакоткани, стеклоткани, кремния, органической резины, бумаги или специальных защитных покрытий.

При избирательной пайке в каждую точку платы, подлежащую пайке, подается через специальную фильеру расплавленный припой (рис. 66).

Плату с установленными элементами и нанесенным на местах пайки флюсом помещают на фильеру и прижимают к ней упорами для создания условий, исключающих захват припоем газообразного флюса. Припою от специального вибратора сообщают колебания удвоенной промышленной частоты. Поршнем припой поднимается к местам пайки.

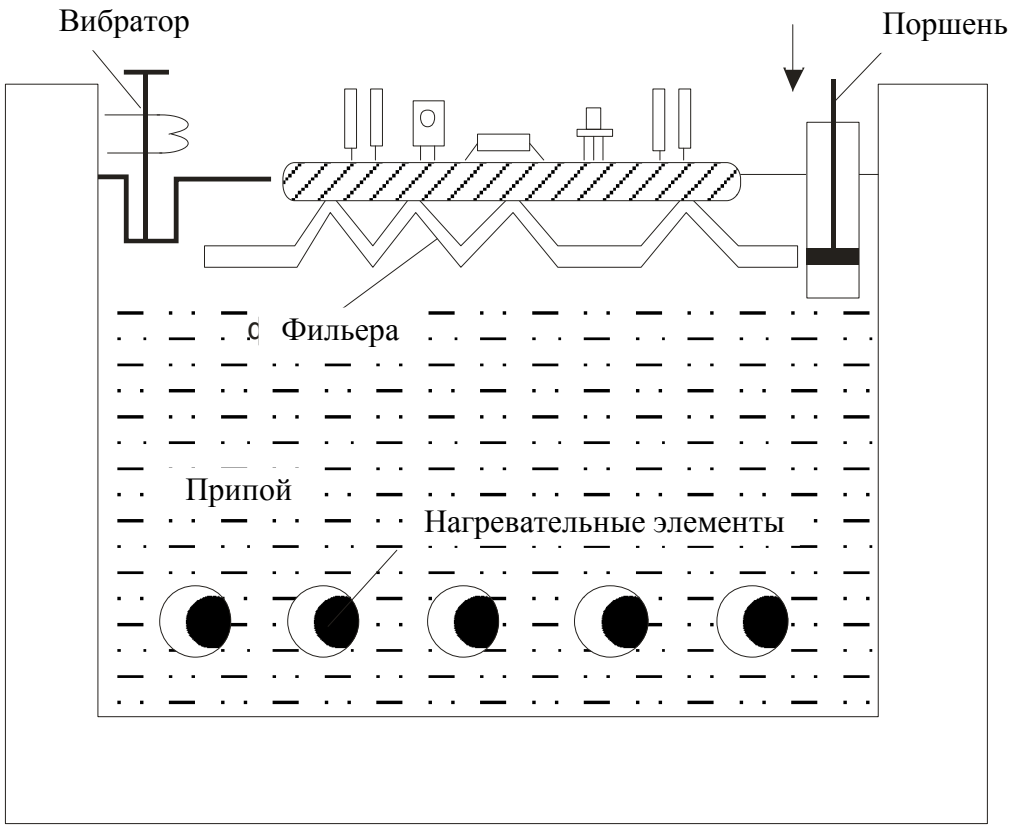
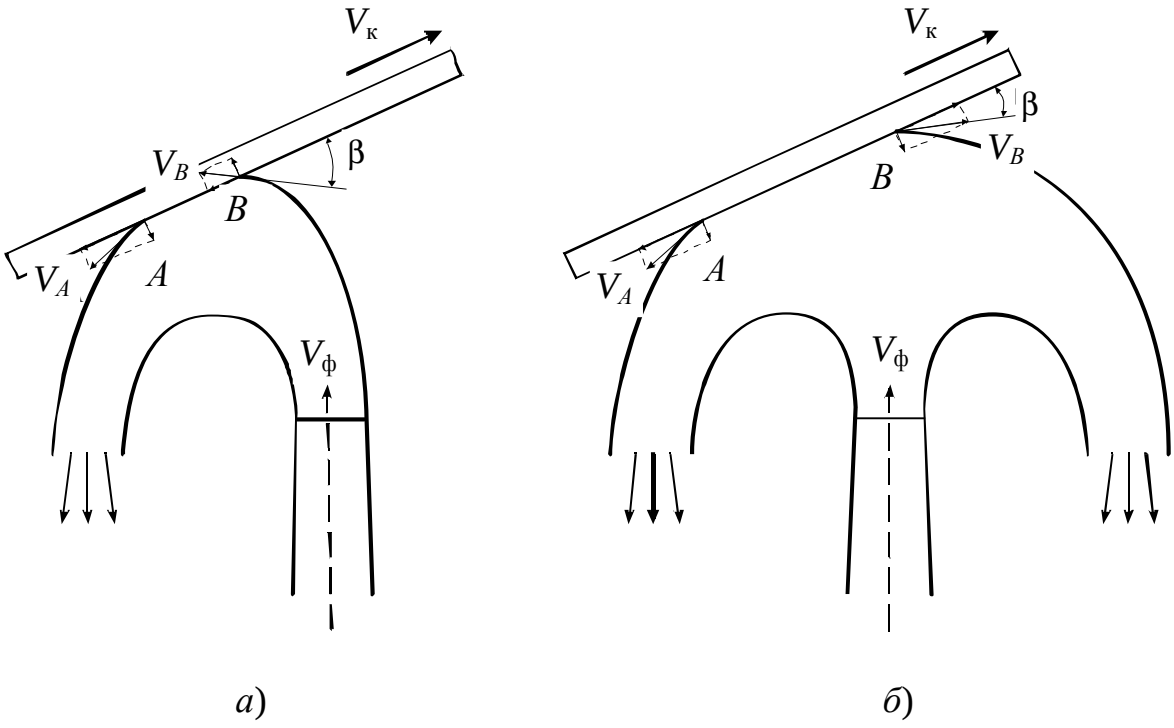


Рис. 66. Избирательная групповая пайка элементов
с радиальными выводами

Избирательная пайка обеспечивает выборочную подачу припоя к паяемым контактам через специальную фильеру, изготовленную из нержавеющей стали. Между платой и фильерой зажимается слой термостойкой резины. При избирательной пайке уменьшается температура платы, снижаются нагрев радиоэлементов и расход припоя. Применяют ее в условиях массового производства, когда изготовление специальной фильеры экономически целесообразно.

Высокое качество пайки обеспечивает способ погружения платы в заполненную сеткой (например, из никеля с размером окон 0,2×0,2 мм) ванну, которая превращается в капиллярный питатель. При соприкосновении платы с сеткой припой выдавливается через ее ячейки и под давлением капиллярного эффекта заходит в зазор между выводами и металлизированными отверстиями. При обратном движении ванны избыток припоя затягивается капиллярами сеточного набора, что предотвращает образование сосулек. Различие в длине выводов не сказывается на качестве пайки из-за гибкости сетки.

При пайке волной припоя печатная плата с ЭРЭ, защищенная маской после нанесения флюса, перемещается над волной (вернее гребнем) припоя (рис. 67).



а) *б*)

Рис. 67. Схема взаимодействия расплавленного припоя с паяемой платой при односторонней (*а*) и двусторонней (*б*) волнах

Особенности взаимодействия расплавленного припоя с платой рассмотрим для односторонней и двусторонней волн. Процесс пайки состоит из трех этапов: вхождение в припой (точка *A*), контактирование с припоем (отрезок *AB*) и выход из припоя (точка *B*). На первом этапе направление скорости фонтанирования волны V_A способствует удалению паров флюса из зоны реакции как при симметричной двусторонней, так и при направленной односторонней параболической волне.

На втором этапе полоса растекания припоя по плате *AB* в сочетании со скоростью конвейера $V_к$ определяет время пайки. При двусторонней волне это время больше за счет достижения более полного заполнения припоем металлизированных отверстий. Увеличение времени взаимодействия, однако, повышает толщину припоя на печатных проводниках до некоторого предела.

Окончательное формирование толщины слоя происходит на выходе платы из волны припоя в точке *B*. При этом в односторонней волне предельная составляющая скорости фонтанирования V_B

вычитается из скорости конвейера, смывает излишки припоя и утоньшает оставшийся слой припоя.

В двусторонней волне скорость V_B складывается со скоростью конвейера $V_к$ и способствует образованию наплывов. Таким образом, в двусторонней волне необходимо стремиться к повышению угла наклона β, увеличению крутизны волны и уменьшению скорости истечения припоя $V_ф$. При односторонней волне более благоприятными являются горизонтальное положение конвейера, пологая форма и возможно большая скорость циркуляции припоя.

Глубина «ныряния» обычно составляет от 0,6 до 0,8 h, где h – толщина основания печатной платы, но может достигать 1,5–2 толщины с носовым козырьком в передней части кассеты.

Дельта-волна характеризуется стоком припоя в одну сторону, для чего одна стенка сопла выполнена удлиненной (рис. 68). Это уменьшает окисление припоя, однако делает чувствительным изменение высоты волны от напора нагнетателя припоя. Более целесообразна в этом отношении «отраженная» волна (см. рис. 68). Здесь за счет применения наклонного отражателя с одной стороны сопла обеспечивается удержание большего количества припоя, чем при дельта-волне, а его сток регулируется изменением угла наклона отражателя и зазором между соплом и отражателем.

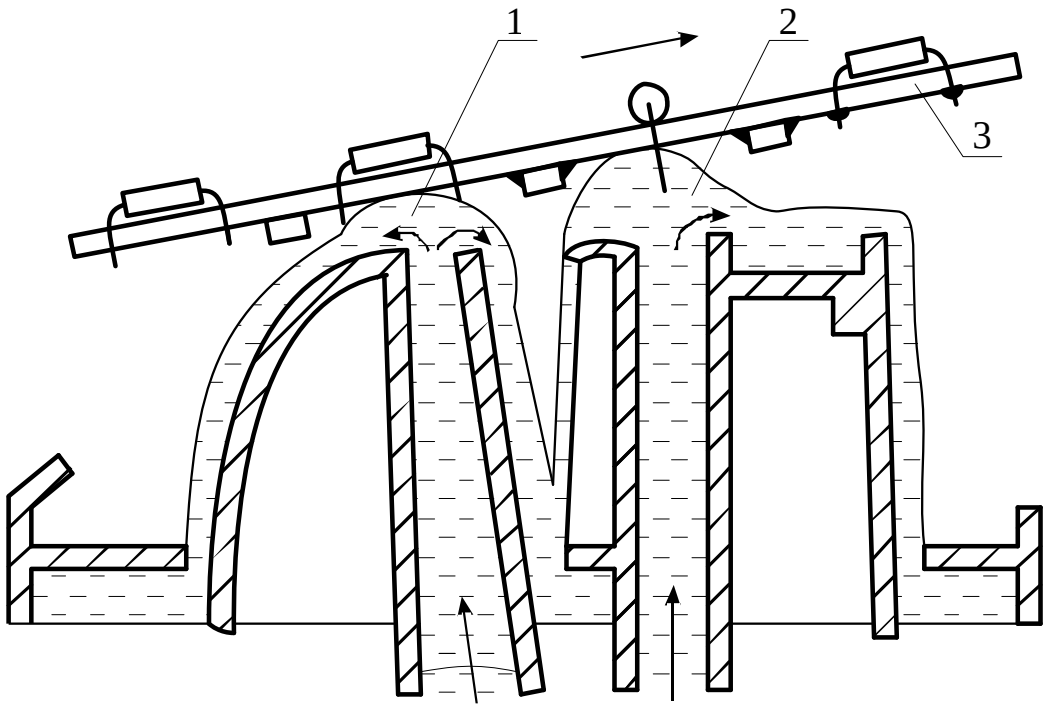


Рис. 68. Пайка двойной волной припоя

Волна припоя в ванне создается над щелевым зазором массивного магнитопровода. При этом мощное магнитное поле индуцирует в расплавленном припое токи большой силы. Возникающие токи создают собственное магнитное поле, направленное противоположно полю в щелевом зазоре. Противоположно направленные магнитные поля отталкиваются, в результате этого расплавленный припой выбрасывается из щелевого зазора в виде волны (гребня).

При этом потери электрической мощности превращаются в тепло и используются для нагрева припоя.

Одним из перспективных направлений стала групповая пайка с предварительным нанесением фиксированных доз припоя. Преимуществами данного направления являются строгое дозирование припоя, локализация теплового воздействия, возможность применения его для плат с двусторонним монтажом и для соединения схем с планарными выводами. Это определяет расширяющуюся область применения такой групповой пайки, несмотря на крупный недостаток – введение дополнительной операции предварительного нанесения припоя в места пайки.

Современные методы групповой пайки в производстве РЭС классифицируются по источникам тепловой энергии, являющимся главным фактором при формировании паяных соединений. Пайка элементов со штыревыми выводами, установленными на ПП, в условиях поточного производства проводится двумя основными методами: погружением и волной припоя. При пайке ПП со смонтированными элементами на 2–4 с погружается в расплавленный припой на глубину 0,4–0,6 ее толщины, что приводит к капиллярному течению припоя и заполнению им монтажных отверстий. Одновременное воздействие температуры на всю поверхность платы приводит к ее перегреву и термоудару. Это вызывает повышенное коробление ПП, что ограничивает их максимальный размер 150 мм с соотношением сторон 1/2. Чтобы ограничить зону действия припоя, на плату с монтажной стороны наносят специальную защитную маску (бумажную, эпоксидную), в которой предусмотрены отверстия под контактные площадки. С этой же целью температуру пайки выбирают более низкой, что также уменьшает потери припоя из-за окисления. Продукты окисления скапливаются на поверхности, и перед каждой пайкой их удаляют металлическим скребком. Частицы растворителя

флюса, попавшие в припой, интенсивно испаряются, что приводит к локальным непропаям. Для уменьшения числа непропаянных соединений применяют пайку погружением с наклоном (5–7°) платы или на плату подают механические колебания частотой 50–200 Гц и амплитудой 0,5–1 мм.

Пайка волной припоя является самым распространенным методом групповой пайки. Она заключается в том, что плата прямолинейно перемещается через гребень волны припоя. Ее преимуществами являются: высокая производительность, возможность создания комплексно-автоматизированного оборудования, ограниченное время взаимодействия припоя с платой, что снижает термоудар, коробление диэлектрика, перегрев элементов. Главным условием высокой разрешающей способности пайки волной припоя, позволяющей без перемычек, мостиков и сосулек припоя паять платы с малыми зазорами между печатными проводниками, является создание тонкого и равномерного слоя припоя на проводниках.

Основным параметром, определяющим качество пайки, являются способ создания и, как следствие, форма волны. Далее представлены установки с различными типами волн (рис. 69–73).

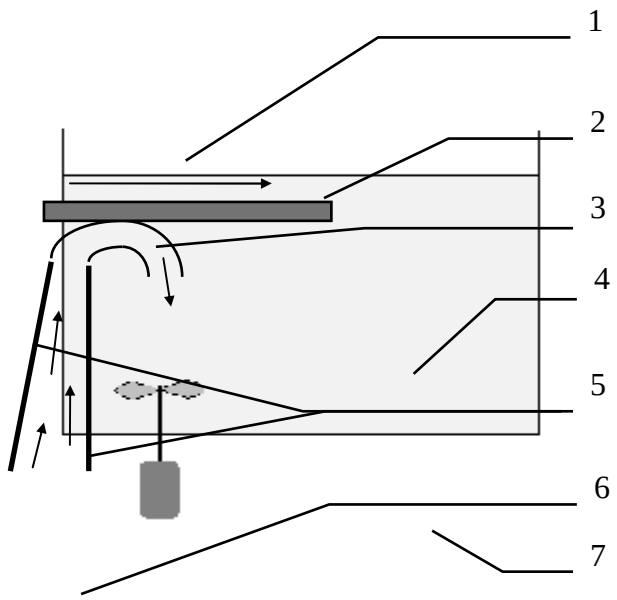


Рис. 69. Пайка дуговой волной припоя:

1 – направление перемещения платы при пайке; 2 – паяемая плата; 3 – волна припоя; 4 – расплавленный припой; 5 – направляющие потока припоя; 6 – нагнетатель; 7 – ванна

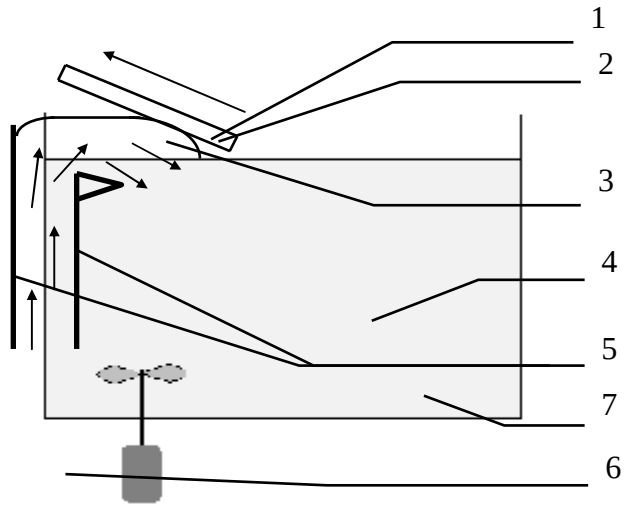


Рис. 70. Пайка дельта-волной припоя:

1 – направление перемещения платы при пайке; 2 – паяемая плата; 3 – волна припоя; 4 – расплавленный припой; 5 – направляющие потока припоя; 6 – нагнетатель; 7 – ванна

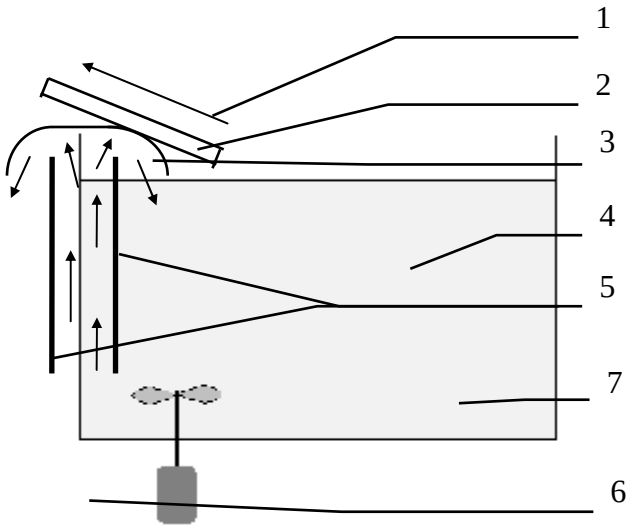


Рис. 71. Пайка плоской волной припоя:

1 – направление перемещения платы при пайке; 2 – паяемая плата; 3 – волна припоя; 4 – расплавленный припой; 5 – направляющие потока припоя; 6 – нагнетатель; 7 – ванна

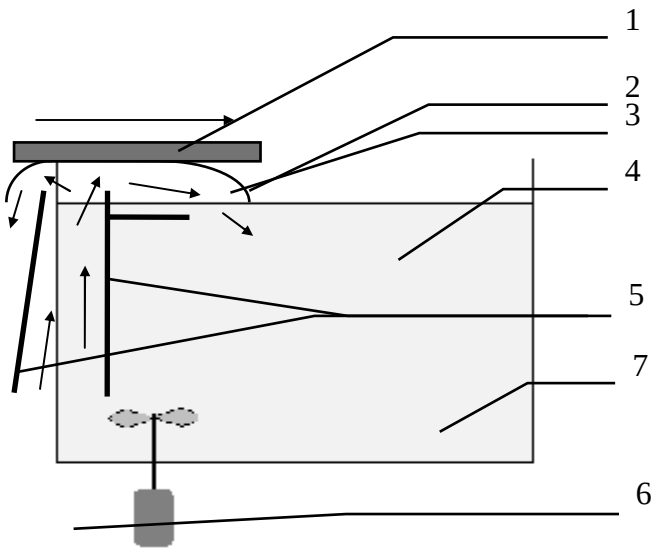


Рис. 72. Пайка модифицированной плоской волной припоя:
1 – направление перемещения платы при пайке; 2 – паяемая плата; 3 – волна припоя; 4 – расплавленный припой; 5 – направляющие потока припоя; 6 – нагнетатель; 7 – ванна

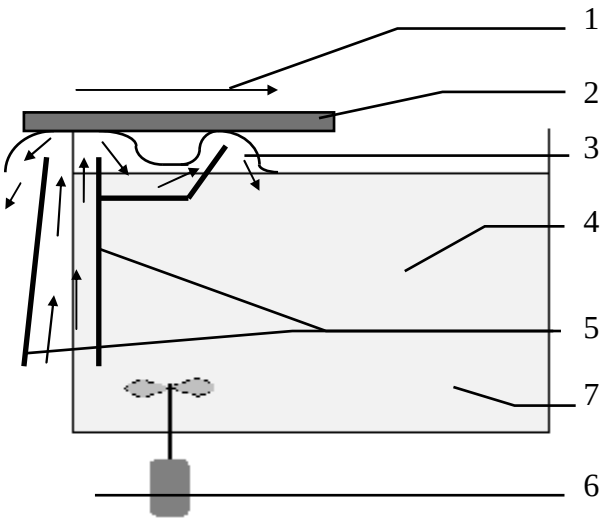


Рис. 73. Пайка со вторичной волной припоя:
1 – направление перемещения платы при пайке; 2 – паяемая плата; 3 – волна припоя; 4 – расплавленный припой; 5 – направляющие потока припоя; 6 – нагнетатель; 7 – ванна

Для образования волны припоя в установках преимущественно используют механические нагнетатели, давление воздуха или газа, ультразвуковые колебания и электромагнитные нагнетатели.

Увеличение ширины волны в направлении движения печатной платы дает положительный эффект в повышении качества пайки при меньшей температуре припоя. Метод пайки со вторичной волной обеспечивает наилучшее качество пайки из всех перечисленных. Метод позволяет точно дозировать количество припоя на КП. Вторичная волна устраняет наплывы и сосульки, образованные первой волной. Таким образом, этот метод наиболее приемлем для производства.

В настоящее время широкое применение в технологии РЭС получают методы пайки концентрированными потоками энергии, достоинством которых являются высокая интенсивность, бесконтактное воздействие источника нагрева на зону контактирования, ограниченная зона теплового воздействия. Разработанные методы активируют не только систему «припой – паяемый материал», но и процессы их физико-химического взаимодействия, что приводит к интенсификации процессов пайки. Пайку элементов с планарными выводами проводят следующими методами: нагретым V-образным инструментом, горячим газом, в парах специальной жидкости, ИК-излучением, токами высокой частоты, лазерным излучением и др.

4.3.4. Пайка алюминия и его сплавов

В практике конструирования РЭС очень часто требуется выполнить соединения алюминиевых деталей с помощью пайки в связи с тем, что крепление детали винтами или заклепками не обеспечивает требуемого постоянства электрического контакта, а сваркой не удается воспользоваться по конструктивным или технологическим соображениям.

Вместе с тем процесс пайки алюминия достаточно труден, что является одной из причин, ограничивающих ее использование. Другая, не менее серьезная причина состоит в том, что место пайки, если не принять соответствующих мер, сильно разрушается коррозией.

Большой контактный потенциал алюминия (–1,3 В) исключает возможность применения многих припоев, в частности, почти всех припоев, сформированных на основе алюминия. Отсутствие алюминиевых припоев с относительно низкой температурой плавления, не вызывающих в дальнейшем коррозии в месте пайки, пожалуй, является самым важным фактором, ограничивающим использование пайки алюминия. Процесс пайки осложняется и вследствие на-

личия на его поверхности трудно удаляемых окислов. Высокая теплопроводность алюминия требует приложения при пайке источников тепла значительной мощности.

Для пайки алюминия легкоплавкими припоями был рекомендован органический флюс, состоящий из 86,4 % триэтаноламина, 8,6 % фторбората алюминия и 5 % фторбората кадмия. При этом температура пайки 275 °С.

Особое внимание при пайке алюминия должно обращаться на подготовку поверхностей деталей. Обычные листовые заготовки не требуют специальной обработки, за исключением удаления (в растворителе) тонкого защитного слоя смазки.

Для штампованных деталей обязательно требуется травление в щелочных ваннах. Детали, выполненные путем выдавки, обычно имеют толстую окисную пленку и выдавленные посторонние частицы. Здесь требуется механическая очистка с последующей обработкой в щелочи.

Конструкции соединений предпочитаются нахлесточные. Однако при применении паяного соединения следует избегать давления на детали или затяжки их при сборке узла. Величина нахлестки такая же, как и у других металлов. При соединении листов толщиной менее 1 мм нахлестка должна быть больше семи толщин, а при соединении листов более 1 мм – не более 3–4 толщин.

Для алюминия не требуется упрочнения паяного соединения применением большой нахлестки, так как предел прочности соединения при нормальной пайке (10–12 кг/мм^2) превышает прочность отожженного алюминия.

Рассмотрим состав цинковых и алюминиевых припоев для пайки алюминия и его сплавов. В табл. 27 приведен химический состав некоторых из них.

Таблица 27

Химический состав припоев для пайки алюминия

Марка припоя	Состав, %					*t*, °С
	Zn	Cu	Pb	Sn	Al	
Б	80	8	–	–	12	300
ПЦАМ-60	64–55	14–15	–	–	22–30	300
Эвтектика	95	–	–	–	5	380
В-63	85	5	1,4	0,6	8	370

Более подробные сведения можно найти в справочниках.

Конструкция соединения должна обеспечить легкость сборки деталей перед пайкой. Закрытые паяные швы следует конструировать с таким расчетом, чтобы обеспечить выход газов из закрытых полостей во время процесса пайки.

Целесообразно конструировать детали, обеспечивающие возможность самофиксации при их соединении, например, с помощью пазов или заклепок, выступов и т.п. При пайке на пламени желательно, чтобы смежные соединяемые элементы конструкции имели одинаковые или близкие по величине размеры; в противном случае могут возникать большие внутренние напряжения. При пайке в печах различие размеров не ограничивается.

Термически обрабатываемые основные металлы могут подвергаться закалке охлаждением в струе воздуха, воды или в бане с холодной или горячей водой.

Сплавы типа дюралюминия Д1 и Д16 и высокопрочный сплав В95 паять очень трудно, поэтому в конструкциях из таких материалов не следует предусматривать паяных соединений.

Соединения алюминия или его сплавов с другими металлами возможны только в определенных сочетаниях, да и то только при использовании легкоплавких припоев (цинковых, кадмиевых, медно-цинковых, оловянно-цинковых и т.п.). Этими припоями можно паять алюминий с медью и медными сплавами, сталью, никелем, серебром. Невозможно производить пайку алюминия с магнием, цирконием, ниобием, танталом, молибденом, вольфрамом.

Литые детали из алюминия, как правило, не паяют – поверхность неровная – трудно удалить окись, а если травить кислотой, то много кислоты остается на поверхности, к тому же литые детали массивны, поэтому требуется подводить очень много тепла.

По критерию паяемости алюминий относится к группе труднопаяемых металлов. Для пайки алюминия и его сплавов применяют алюминиевые припои с нагревом различными способами: погружением, горелкой, токами ВЧ и в печах с применением флюса. Пайка алюминия и его сплавов ацетилено-кислородным пламенем недопустима. Для понижения $t_{пл}$, увеличения механической прочности и коррозийной стойкости в состав этих припоев добавляют кремний, медь, олово, цинк и другие металлы. Химический состав и свойства некоторых алюминиевых припоев приведены в табл. 28.

Таблица 28

Химический состав и свойства алюминиевых припоев

Марка припоя	Содержание элементов, %					Плотность, г/см^3	$t_{пл}$, °С
	Al	Cu	Si	Zn	Mn		
П590А	89	10	1	–	–	2,89	590
П575А	80	–	–	20	–	3,08	575
П550А	65,5	27	6	–	–	3,41	550
34А	66	28	6	–	–	3,33	525
В62	51,5	20	3,5	25	–	3,8	500
П480А	20	15	–	64,4	0,6	5,69	480
П425А	20	15	–	65	–	5,7	425

Кроме указанных в таблице, для пайки алюминия применяют припои АВИА-1(2) с $t°_{пл}$ = 200–250 °С, в состав которых входят: алюминий (15 %), олово (40–55 %), кадмий (20–25 %), цинк (20–25 %); а также припои ВПТ-3 и ПА-2, имеющие в своем составе соответственно: медь (25 и 20 %), кремний (6 и 8 %), алюминий (69 и 72 %). Эти припои имеют $t°_{пл}$ = 530 °С.

Для удаления окисной пленки с поверхности алюминия используют активные флюсы, содержащие хлориды, фториды, а иногда и криолит. Пайку с активными плюсами производят в пламени, в печах и погружением. При этом важно поддержать ±10 % изменения температуры.

В табл. 29 приведен химический состав основных флюсов и паст, обладающих повышенной активностью.

Таблица 29

Химический состав основных флюсов и паст

Марка флюса	Компоненты	Состав, %	$t_{пайки}$, °С
1	2	3	4
Состав № 1	Хлористый калий	40	–
	хлористый литий	15	
	хлористый натрий	12	
	хлористый цинк	12	
	хлористый магний	6	
	фтористый натрий	7	

Окончание табл. 29

1	2	3	4
Состав № 2	Хлористый калий хлористый литий хлористый цинк фтористый калий	43–59 25–30 8–15 8–12	–
Состав № 3 (Флюс ВАМИ)	Хлористый калий хлористый натрий криолит	50–55 30–35 10–20	–
Ф370А	Хлористый калий хлористый литий хлористый кадмий фтористый натрий	47 38 10 5	370
Ф380А	Хлористый калий хлористый литий хлористый цинк фтористый натрий	47 38 10 5	380
34А	Фтористый натрий хлористый цинк хлористый литий хлористый калий	10±1 8±2 32±3 50±6	420–650

С помощью этих флюсов можно производить пайку бензино-воздушной горелкой (при использовании в качестве паяльника комплектуется четырьмя паяльными призмами), токами ВЧ, погружением и в печах. Остатки кислотных флюсов, имеющих в своей основе хлористые соединения, вызывают интенсивную коррозию паяного шва и основного металла. Поэтому применение этих флюсов допустимо лишь при условии тщательной промывки и удаления после пайки остатков флюса с поверхности паяных изделий. Остатки флюса, в состав которого входят хлористый цинк и вода, удаляются промывкой изделия 5 %-м раствором кальцинированной соды с последующей двукратной промывкой горячей (50–80°) водой. После промывки изделия протирают мягкой тряпкой или сушат в специальном шкафу при *t* 100–110 °С.

При применении указанных припоев и флюсов процесс пайки алюминиевых деталей каких-либо трудностей не представляет.

Но из-за дефицитности некоторых компонентов флюса радиолюбители иногда не могут ими воспользоваться. В таком случае можно воспользоваться упрощенными методами. Прежде всего провода предварительно облуживают: концы покрывают канифолью, кладут на наждачную бумагу со средним зерном и горячим залуженным паяльником прижимают к наждачной бумаге, добавляя все время канифоль на залуживаемый конец. Чтобы провод залудился хорошо, эти операции необходимо повторить несколько раз, после чего пайка производится обычным способом. При пайке листового алюминия и его сплавов на шов горячим паяльником наносят канифоль с мелкими железными опилками и залуженным паяльником начинают протирать место шва, все время добавляя припой. Шов под слоем канифоли залуживается и спаивается, после чего лишний припой удаляют. Можно использовать пасты с железными или абразивными добавками (паста для правки бритв, паста ГОИ, шлифовальные порошки и т.п.). После нанесения канифоли на поверхность алюминиевого провода (пластины) его прогревают паяльником и затем добавляют пасту. Нагреваясь, она плавится и смешивается с флюсом (канифолью), после чего процесс лужения и последующей пайки производится обычным способом. Неплохие результаты дает пайка алюминия с использованием ПХВ трубки. Сначала место пайки зачищают и обезжиривают, затем жалом хорошо прогретого паяльника с каплей припоя растирают на месте пайки отрезок ПХВ трубки до получения равномерного слоя, после чего детали спаивают, как обычно.

Кроме флюса марки 34А, применяются другие марки флюсов для пайки алюминия твердыми припоями с нагревом ТВЧ или электроконтактным нагревом. Однако эти флюсы обладают сильно корродирующим действием, поэтому остатки их необходимо тщательно удалить сразу же после пайки. Пайка алюминиевых деталей между собой и другими деталями мягкими припоями производится с помощью некорродирующих флюсов Ф54А, Ф59А, Ф61А. Эти флюсы применяются при пайке обычными электропаяльниками с применением припоев ПОС-61, П200А, П17ПА и др.

Для пайки алюминия с применением флюсов типа 34А применяется ряд твердых припоев с пониженной температурой плавления: П590А, П575А, П550А, П480А, П425А, П300А.

Эффективное средство удаления окисной пленки с поверхности алюминиевых деталей при пайке – применение ультразвука. Фокусировка ультразвуковых колебаний на кончике паяльника вызывает кавитацию в расплавленном припое, покрывающем место пайки, которая, в свою очередь, приводит к эрозии окисной пленки – пленка как бы стряхивается, обнажая чистую поверхность основного металла. Кавитация – это нарушение сплошности жидкости, возникающее при действии знакопеременного давления.

При ультразвуковой пайке алюминия и его сплавов флюсы не применяются. Используют легкие оловянно-свинцовые припои (П150А, П170А, П200А, П250А, П500А) и специальные паяльники, рабочая часть стержня которых колеблется с частотой 16–22 кГц.

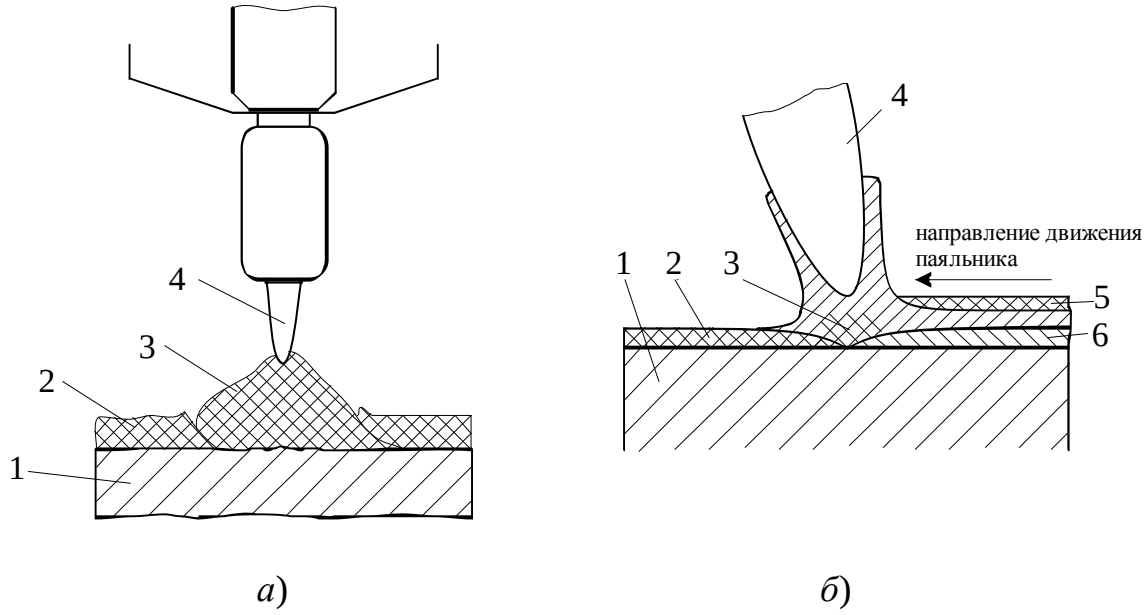
Для возбуждения продольных колебаний рабочей части стержня паяльника в ультразвуковом диапазоне могут быть применены любые вибраторы. Наилучший эффект дают магнитострикционные вибраторы, стабильно работающие при температурах пайки.

Простейший магнитострикционный вибратор представляет собой магнитопровод с обмоткой, питаемой переменным током. Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод собирают из тонких изолированных друг от друга листов.

Для пайки алюминия и его сплавов используют ультразвуковые вибрационные паяльники с нагревательными элементами или без них. Нагрев рабочего стержня паяльника вызывает повышение температуры магнитострикционного вибратора, при этом амплитуда колебаний последнего уменьшается сравнительно медленно. Передача ультразвуковых колебаний от вибратора к рабочему стержню паяльника осуществляется через металлическую соединительною колодку. Соединительная колодка, если ей придать соответствующую форму, может служить механическим преобразователем импеданса. В этом случае можно увеличить интенсивность колебаний рабочего стержня по сравнению с колебаниями, получаемыми торцевой поверхностью вибратора, но при этом колебания повышенной интенсивности воздействуют на соответственно меньшую площадь. Значительно проще конструкция ультразвукового вибрационного паяльника без нагревателя. Применение этого паяльника связано с необходимостью нагрева паяемых или облущиваемых деталей с помощью газовой горелки или электроплитки.

Для ручного облуживания используются специальные ультразвуковые паяльники, работающие от звуковых генераторов с часто-

той 20–22 кГц. Скорость лужения достигает 0,25–0,16 см^2/с. Проверку качества лужения производят путем протирки ветошью горячего припоя; при этом необлуженные места остаются хорошо заметными (рис. 74).



а) *б*)

Рис. 74. Схемы, иллюстрирующие процесс разрушения ультразвуковыми колебаниями пленки окислов алюминия:

а – процесс лужения алюминия; *б* – процесс пайки;

1 – металлический алюминий; 2 – пленка окислов на поверхности алюминия; 3 – область возникновения в расплавленном припое процессов кавитации; 4 – наконечник паяльника; 5 – слой шлака; 6 – слой сплава припоя с поверхностью алюминия

Несмотря на отмеченные выше преимущества облуживания и пайки алюминиевых сплавов с помощью ультразвука, этот способ пайки не нашел еще широкого применения, препятствием этому являются относительная сложность процесса, необходимость специального оборудования и инструмента. Кроме того, при пайке с помощью ультразвука рабочий быстро утомляется.

Пайка алюминиевых деталей в соляных ваннах осуществляется погружением деталей в ванну с расплавленными солями, которые являются не только теплоносителями, но и флюсом.

За счет кавитации в расплаве припоя окисная пленка отслаивается, и припой равномерно покрывает поверхность основного металла, чем и обеспечивается высокое качество спая.

Наконечник паяльника 4 под действием возбудителя УЗ колебаний (на рис. 74 условно не показан) осуществляет продольные колебания. В расплаве роя 3 эти колебания вызывают кавитацию, воздействие которой разрушает юную пленку 2 металлического алюминия 1. Поверхность 1 очищается от окислов, которые в виде слоя шлаков 5 удаляются с поверхности припоя.

Очищенная поверхность алюминия без проблем воспринимает припой, и тем самым происходит пайка алюминия и его сплавов, образуя слой 6 сплава припоя с поверхностью алюминия.

В последнее время широкое распространение получала пайка с электроконтактным нагревом. Процесс такой пайки состоит в пропускании через металлические или графитовые электроды, между которыми установлены детали, электрического тока промышленной частоты под напряжением 6–12 В. Нагрев деталей происходит за счет джоулева тепла и конвекции от разогретых электродов. Электроконтактный нагрев не требует высоких напряжений и отличается простотой, компактностью и высоким КПД оборудования. Установка электроконтактного нагрева всегда готова к работе и потребляет электроэнергию лишь в момент нагрева.

Следует отметить, что почти все алюминиевые сплавы поддаются лужению и пайке с помощью ультразвуковых колебаний, исключением являются только сплавы с высоким содержанием магния.

Попытки использовать ультразвуковые колебания для лужения и пайки таких металлов, как бериллий, титан и их сплавы, а также нержавеющей стали и нихрома не увенчались успехом. Также не удаются лужение и пайка тонких проводов и фольги путем погружения в расплавленный легкоплавкий припой, находящийся под воздействием ультразвуковых колебаний, так как такие провода и тонкая фольга рвутся.

Облуживание в ваннах с горячим припоем с помощью ультразвука дает хорошие результаты не только с алюминиевыми деталями, но и с деталями из других материалов, с которых по каким-либо причинам не удается удалить окисные пленки или загрязнения.

Применяя пайку погружением в расплавленный припой, приходится считаться с возможностью покрытия им не только места соединения, но и других частей конструкции. Необходимость защиты этих мест от попадания на них припоя является одним из недостатков пайки в расплавленных припоях.

В качестве защитных приспособлений могут быть использованы металлические или изоляционные маски. Металлические маски одновременно служат в таком случае, как тепловые экраны, защищающие изделие от перегрева. В качестве таких экранов часто используют специальные алюминиевые детали. Материалом для изоляционных защитных деталей обычно служит фторопласт. К недостаткам также относятся и некоторые технологические трудности осуществления этого способа пайки: ванны с припоем быстро загрязняются компонентами сплава соединяемых деталей и флюсом; верхние слои расплава припоя из олова и свинца обедняются свинцом. Приходится прибегать к перемешиванию припоя, а иногда и к рафинировке и корректировке.

В процессе пайки погружением в припой механическое воздействие на поверхности соединяемых деталей сравнительно мало, поэтому оно не может приниматься в расчет как фактор, помогающий очистке деталей. Это обстоятельство вызывает необходимость проведения очень тщательной предварительной очистки поверхностей соединяемых деталей и использования обильного количества флюса. Если при пайке отдельных соединений (например, проводов между собой или с контактными лепестками) такая подготовка не вызывает трудностей, то для конструкций с большими поверхностями или с большим числом одновременно паяемых соединений она часто создает большие трудности. В связи с этим для пайки погружением в расплавленный припой часто приходится ограничиваться использованием деталей из меди и медных сплавов. Иногда могут применяться и стальные детали.

Во всех случаях поверхности соединяемых деталей целесообразно предварительно облуживать. Следовательно, для получения надежных паяных соединений в конструкции должны быть использованы луженые детали или предусмотрено в чертежах предварительное лужение поверхностей деталей, предназначающихся для пайки.

Перед пайкой соединение флюсуется. Для флюсования узлов с нелужеными деталями иногда используется водный раствор хлористого цинка и хлористого аммония: 10–15 %-й (по весу) хлористый цинк, 5–7 %-й хлористый аммоний и остальное вода. При этом содержание свободной соляной кислоты во флюсе должно быть в пределах 0,6–0,8 % (по весу). Длительность флюсования 3–6 мин. Затем деталь выдерживается под ванной с флюсом 1–2 мин для стекания последнего. Обычно для такой пайки (или облуживания)

используется припой ПОС-40, нагревающийся до температуры 330–360 °С. Выдержка равна примерно 1 мин. Вынутый из ванны узел выдерживается над нею в течение 30 с для стекания лишнего припоя.

При групповом погружении в припой одновременно нескольких узлов, подлежащих пайке, часто используют специальные вибрационные держатели, с помощью которых и стряхиваются излишки припоя с мест соединения. В процессе ручного лужения мелких деталей стряхивание производят путем небольшого резкого удара плоскогубцами, в которых держится деталь, об стенку ванны.

Для многих паяных соединений и особенно для соединений тонкостенных деталей или деталей, рассчитываемых для работы в жестких климатических условиях, как известно, допускается применение только канифольного флюса. Поскольку он менее активен, чем упомянутый выше хлористый, то обеспечить с ним надежное паяное соединение, как уже отмечалось, можно только с хорошо облуженными деталями. Узлы, которые паялись с активными флюсами, должны обязательно хорошо промываться в ванне с проточной горячей водой, нагретой не ниже чем до 70 °С, и просушиваться при 100–120 °С в сушильном шкафу, оборудованном вентиляцией.

При использовании специальных флюсов подобной обработки не требуется. После пайки с канифольным флюсом нужно производить очистку от него готового изделия, используя для этого растворители, а иногда и специальные щетки.

Поскольку в радиотехнической промышленности пайка погружением в расплавленный припой используется главным образом для электромонтажных соединений печатных схем, то ее целесообразно рассмотреть более подробно отдельно.

Пайка в ваннах с расплавленными припоями состоит в том, что узел, подлежащий пайке, очищенный от грязи, жиров и окислов и хорошо обработанный флюсом, погружается в горячий припой, который, затекая в зазоры между деталями, образует паяное соединение. Этот способ пайки в настоящее время нашел широкое применение для соединений различных конструкций. Однако его использование в радиопромышленности пока еще ограничено только легкоплавкими припоями.

Основное преимущество рассматриваемого способа пайки заключается в возможности повышения производительности как при ручной пайке, так и при механизированной, машинизированной и

автоматизированной. Возможность широкого использования машин для пайки явилась в свое время той особенностью, которая создала предпосылки для внедрения этого способа в радиотехническую промышленность. Необходимость машинизации пайки возникла при освоении печатных схем, в которых число паяных соединений было достаточно большим и при использовании обычных ручных способов пайки (с помощью паяльников) малопроизводительным. Не следует, однако, думать, что только для печатных схем пайка в ваннах с расплавленным припоем имеет преимущества перед другими способами, использующими легкоплавкие припои. Применяя небольшие по размеру ванны и используя их для пайки соответствующих узлов, можно добиться очень хороших результатов как по качеству, так и по производительности. Известно, что для облуживания мелких деталей давно применяется рассматриваемый метод.

Для небольших узлов и блоков, в которых требуется выполнять сравнительно большое количество паек, также очень удобно пользоваться указанным способом. При этом конструкция узлов и блоков должна быть выполнена таким образом, чтобы соединения либо порознь, либо все вместе допускали погружение в расплавленный припой без боязни повредить какие-либо их части. Если осуществлять пайку при полном погружении узла в припой, то расход последнего может оказаться слишком большим и использование такой пайки становится экономически нецелесообразно.

4.3.5. Методы пайки компонентов

В этом разделе будут рассмотрены методы оплавления припоя и дана их сравнительная характеристика.

В настоящее время в промышленности наиболее широко применяются следующие методы пайки:

- метод теплопроводного нагрева;
- метод инфракрасного нагрева;
- метод паровой фазы;
- пайка волной припоя.

Существуют еще несколько менее распространенных методов, все они будут рассмотрены ниже.

Теплопроводный нагрев

Это – наиболее простой метод. Заключается в том, что плата, помещенная на транспортерную ленту, последовательно проходит через два нагревателя. Первый служит для смягчения теплового удара, возникающего при нагреве. Второй нагреватель доводит разогретую плату до температуры плавления припоя. Режим разогрева и пайки плат устанавливается путем регулирования температуры нагревателей и регулирования скорости движения транспортерной ленты.

Инфракрасный нагрев

Инфракрасное оплавление – другой метод, обычно используемый в промышленности. Так как он не зависит от теплопроводности материала подложки, то его можно применять не только для пайки плоских подложек. В инфракрасной системе используют один из трех типов эмиттеров:

- вольфрамокатодные лампы прямого накала;
- нихромосплавные кварцевые лампы;
- пространственно распределенные эмиттеры.

Вольфрамокатодные лампы прямого накала

Вольфрамовый нитевидный эмиттер только частично подходит для процесса пайки припоя. Дело в том, что температура нити накала равна 2246 °С, что гораздо выше температуры плавления оловянно-свинцового припоя. При более низкой температуре нити накала лампа работает неэффективно. Поэтому при неправильной регулировке лампы плата может быть повреждена.

Другая проблема в селективности нагревания различающихся по цвету участков платы. В околоинфракрасном диапазоне длин волн генерируемое инфракрасными лампами излучение отражается от проводников и поглощается более темной смолой плат. Могут перегреваться также и компоненты, имеющие темные участки, что может привести к выходу их из строя.

И последняя сложность заключается в том, что инфракрасное излучение обладает малой проникающей способностью, в результате большие компоненты могут затенять некоторые места, что делает невозможной пайку в этих местах.

Нихромосплавные кварцевые лампы

Нихромосплавные кварцевые лампы являются более совершенными по сравнению с вольфрамовыми лампами. Этот тип источника эффективно функционирует в диапазоне температур от 500 до 1100 °С. Нихромосплавные источники имеют меньшую цветовую селективность по сравнению с вольфрамовыми, так как они имеют более низкую температуру нити накаливания, а также потому, что часть энергии (около 10 %) передается путем конвекции. Из-за наличия конвекции меньшее значение имеет неравномерность нагрева, вызванная затемнением части плат крупными компонентами.

Пространственно распределенные эмиттеры

Нагреватели на основе пространственно распределенных эмиттеров менее всего подвержены влиянию цветовой селективности. Эмиттер представляет собой резистивный элемент, размещенный на керамическом цоколе. Причем цоколь обладает способностью отражать ИК-лучи. До 40 % теплоты в таком устройстве переносится за счет конвекции, этим объясняется низкая цветовая селективность.

Пространственно распределенные эмиттеры могут разрабатываться для нагрева до 800 °С, но обычно они используются при температурах от 200 до 400 °С. К недостаткам таких систем можно отнести значительное время, требуемое для перехода от одного температурного режима к другому. Из-за того, что значительная часть тепловой энергии переносится за счет тепловой конвекции, может потребоваться 20 мин для стабилизации системы в отличном тепловом режиме. В типичных системах, построенных на основе пространственно распределенных эмиттеров для формирования теплового профиля, применяются от 4 до 7 независимых зон.

Пайка в паровой фазе

Разработка этого метода пайки была вызвана необходимостью избавиться от недостатков, присущих методам, связанным с ИК-излучением и конвекцией. Принцип пайки в паровой фазе состоит в том, что плата с размещенными на ней компонентами погружается в пары кипящей длинномолекулярной гидрокарбонатной жидкости. Температура кипения этой жидкости составляет приблизительно 215 °С, что выше температуры плавления припоя. Таким образом, при взаимодействии паров с поверхностью платы проис-

ходит оплавление припоя. Жидкость, применяемая в этом методе, чрезвычайно дорога (от 125 до 180 долл. за 1 л). Поэтому при разработке производственного оборудования и в процессе производства следует предпринимать все меры, способные сократить расход этой жидкости при оплавлении плат. Наиболее эффективной мерой является использование вторичной жидкости, кипящей при более низкой температуре. Испарения вторичной жидкости образуют оболочку над парами первичной жидкости, препятствуя тем самым их потере. Установки, использующие для оплавления паровую фазу, делятся на два типа: по способу загрузки плат в зону оплавления – установки, работающие в пакетном режиме, и установки, работающие в непрерывном режиме подачи плат.

Пакетный режим

Пакетный режим представляет собой способ пайки плат в паровой фазе. При этом подготовленные платы помещаются в «корзину», которая затем помещается в зону оплавления, образованную парами кипящей жидкости. Контролируя температуру жидкости, можно управлять режимом нагрева плат. Это важно в случаях, когда компоненты плат и сами платы боятся термоударов. Основной недостаток метода в том, что при помещении и особенно при последующем извлечении «корзины» с платами из зоны нагрева происходит потеря жидкости в виде паров, вырывающихся в окружающую среду. Помимо потерь дорогостоящей жидкости, происходит попадание в атмосферу углеродистых и других токсичных соединений, что представляет угрозу окружающей среде. Кроме того, при нагреве жидкости до температуры разложения (что может произойти при аварийной ситуации в системе) происходит выброс еще более токсичных веществ. Этого недостатка пытаются избежать, конструируя установки с двойными камерами – основной и предварительной. В основной происходит непосредственное оплавление парами, а предварительная камера служит для предварительной и заключительной выдержки «корзины» с целью уменьшения потерь паров дорогостоящей жидкости при извлечении «корзины» из установки. Пакетный режим наиболее подходит для массового производства одинаковых плат.

Непрерывный режим

При непрерывном режиме платы располагаются друг за другом на движущейся конвейерной ленте и последовательно проходят

через зоны оплавления. Непрерывная система обеспечивает более высокую производительность. Но в этих системах сильно затруднен процесс контроля и управления оплавлением по сравнению с пакетным режимом, где для каждой «корзины» можно задать свои условия оплавления. Для обеспечения необходимого теплового профиля вводятся входные и выходные нагреватели.

Вторым недостатком является то, что платы располагаются на конвейерной ленте в наклонном состоянии, что необходимо для скатывания с плат конденсата жидкости. Однако угла наклона в 5–10° оказывается достаточно, чтобы в некоторых случаях вместе с конденсатом скатывались и компоненты.

4.3.6. Пайка в инертной атмосфере

Азот используется при пайке оплавлением для удаления кислорода из зоны пайки. Это предотвращает окисление припоя, контактных площадок и выводов компонентов в процессе оплавления паяльной пасты.

Преимущества использования азота в процессе пайки оплавлением являются предметом многочисленных дискуссий и зависят от множества факторов, таких как тип покрытия контактных площадок печатной платы, тип пасты, паяемость выводов компонентов. Существует мнение, что использование азота не улучшает качество паяных соединений. В качестве аргумента приводится тот факт, что частицы паяльной пасты окисляются еще на этапе ее производства. И даже при остаточном уровне кислорода в печи 10 ppm окисление частиц пасты уменьшается только как 1:60 по сравнению с пайкой в воздухе. Тем не менее процесс пайки в среде азота обладает рядом общепризнанных преимуществ:

- более широкое технологическое окно процесса;
- большее поверхностное натяжение и меньшее вторичное окисление выводов компонентов приводят к увеличению поверхности выводов компонентов, смачиваемой припоем, вплоть до 30 % и обеспечивает лучшее самоцентрирование компонента в случае его установки со смещением;
- меньшее вторичное окисление также увеличивает смачивание контактных площадок с покрытием NiAu или Cu;
- большее поверхностное натяжение припоя уменьшает вероятность образования шариков припоя при использовании пасты с

мелкими частицами припоя, имеющей большую площадь поверхности частиц, – частицы спаиваются более легко;

- поверхность паяного соединения выглядит более гладкой и в некоторых случаях более глянцевой;
- возможность использования слабо- и среднеактивированных флюсов;
- более высокая надежность при пайке BGA-компонентов;
- благодаря большему поверхностному натяжению компоненты, обладающие большей массой и размерами, могут удерживаться на нижней стороне платы при пайке оплавлением двусторонних печатных узлов в два этапа;
- меньшее повторное окисление паяных соединений на нижней стороне платы при пайке оплавлением двусторонних печатных узлов в два этапа;
- меньшее изменение цвета платы при пайке.

Пайке в среде азота свойствен и ряд недостатков:

- увеличение стоимости – главный недостаток;
- большее поверхностное натяжение может приводить к увеличению вероятности возникновения перемычек припоя при пайке компонентов с малым шагом выводов в случае неточного нанесения паяльной пасты;
- увеличение вероятности возникновения эффекта «надгробного камня».

Область применения пайки в среде азота:

- пайка бессвинцовыми припоями;
- пайка двусторонних плат;
- пайка компонентов с малым шагом выводов;
- пайка по чистой меди.

Каков максимально допустимый остаточный уровень кислорода? Это зависит от состояния печатной платы, компонентов и используемой пасты. Если контактные площадки или выводы компонентов обладают плохой паяемостью и активность флюса мала, необходимо обеспечить низкий остаточный уровень кислорода. Остаточный уровень кислорода должен лежать в пределах 100–1000 ppm в зависимости от вышеупомянутых факторов. При использовании паяльных паст с малоактивным флюсом остаточный уровень кислорода, возможно, должен быть еще ниже. Единственный способ оп-

ределения верного остаточного уровня кислорода – это проведение экспериментов при различных уровнях. Одним из вариантов может быть пайка ряда ПП с постепенным сокращением остаточного уровня кислорода с последующим визуальным контролем сформировавшихся паяных соединений. Такой эксперимент подскажет максимально допустимый остаточный уровень кислорода.

Визуальный контроль с использованием микроскопа подтверждает улучшение качества паяных соединений, полученных при пайке в среде с низким содержанием кислорода. Если во время испытаний производить постепенное снижение остаточного уровня кислорода, то можно легко наблюдать улучшение смачивания контактных площадок и выводов компонентов. Это особенно заметно на медных выводах микросхем, смоченных припоем с дальнейшим образованием качественной галтели в азотной среде.

Потребление азота зависит от исходной чистоты азота, типа печи и остаточного уровня кислорода, который необходимо обеспечить.

Как правило, исходная чистота азота составляет 5 ppm остаточного кислорода. Такая чистота может быть обеспечена только использованием жидкого азота. Для получения газообразного азота из жидкого используются специальные испарители. Если длина трубопровода от испарителя до установки превышает 50 м и проходит по зданию, нет необходимости в дополнительном оборудовании для нагрева газообразного азота.

Примерное потребление азота в печах серии Hotflow представлено в табл. 30. Приведенные данные соответствуют следующим исходным параметрам:

– ширина конвейера 250 мм;

– высота компонентов 15 мм;

– азот 5.0 (чистота $0_2 < 5$ ppm).

Таблица 30

Примерное потребление азота в печах серии Hotflow

Остаточный уровень кислорода	Примерный расход азота
20 ppm	23–26 Мі/ч
50 ppm	19–23 Мі/ч
100 ppm	16–19 Мі/ч
500 ppm	11–15 Мі/ч

Потребление азота также зависит от системы управления подачей азота. Существуют два конструктивных исполнения печей: только с расходомерами, позволяющими контролировать расход азота, подаваемого в печь, и с регулированием остаточного уровня кислорода в печи. Печи с регулированием остаточного уровня кислорода снабжены газоанализатором, регистрирующим текущий уровень кислорода в печи и обеспечивающим обратную связь с системой управления пропорциональным клапаном, автоматически увеличивающим или уменьшающим подачу азота в печь в зависимости от текущего уровня остаточного кислорода.

Какова экономическая выгода пайки в среде азота? Она должна рассчитываться в каждом конкретном случае. Экономия средств вследствие снижения уровня брака при пайке может быть определена довольно просто. Но другие выгоды рассчитать гораздо сложнее. Однако все сводится к сравнению экономии средств и других преимуществ со стоимостью азота и оборудования для его подачи.

4.3.7. Пайка бессвинцовыми припоями

Согласно директивам Европейского сообщества (ЕС) с 1 июля 2006 г. запрещается применение свинца в производстве электроники во всех странах, входящих в ЕС. Использование бессвинцовых припоев вынуждает производителей знакомиться с новыми материалами и адаптировать существующие производственные процессы под новые требования.

Наиболее вероятной заменой традиционных оловянно-свинцовых припоев может стать припой на основе олова, содержащий серебро и медь (Sn/Ag/Cu). Однако для внедрения в производство такого припоя необходимо сначала преодолеть ряд трудностей. Например, при использовании традиционного оловянно-свинцового припоя неудовлетворительное смачивание поверхностей может быть частично компенсировано увеличением температуры пайки, что гораздо сложнее реализовать при пайке припоями Sn/Ag/Cu. Использование бессвинцовых припоев приводит к сужению окна технологического процесса, так как у них температура ликвидуса выше и материалы, из которых изготовлены печатные платы (ПП), имеют ограниченные максимально допустимые температуры нагрева, которому они могут подвергаться в течение определенного

промежутка времени без возникновения повреждений. Одним из способов компенсации сужения окна технологического процесса и сокращения разницы между температурой пайки и ликвидуса является пайка в среде азота.

Так как применение свинца в электронной промышленности будет запрещено в скором времени, необходимо найти подходящую замену свинцовосодержащим припоям и покрытию выводов компонентов и контактных площадок. Этот поиск, ведущийся, по крайней мере, 15 лет, интенсифицировался в последнее время. Исследования и испытания различных припоев привели к появлению рекомендаций по применению припоев на основе олова, содержащих небольшой процент серебра и/или меди и/или висмута, а некоторые предприятия уже внедрили их в производственный процесс. Однако замена свинца оловом приведет к повышению температуры ликвидуса припоя со 183° С (для припоя Sn63/Pb37) примерно до 210–230 °С в зависимости от состава припоя.

Повышение температуры приведет к увеличению скорости окисления. Олово, являясь основным компонентом многих бессвинцовых припоев, окисляется значительно быстрее, чем свинец. В действительности, значение коэффициента роста оксидной пленки для припоя из чистого олова в два раза выше, чем для припоя Sn60/Pb40. Одним из способов уменьшения влияния окисления является применение высокоактивных флюсов для удаления окислов в процессе пайки. Другой, более экологически безвредный способ заключается в использовании малоактивных флюсов и защите припоя от окисления с помощью инертной среды, например, азотной.

Ниже приведены основные типы бессвинцовых припоев и их температуры плавления (табл. 31). Рассмотрим каждый из этих припоев.

Таблица 31

Типы и температуры плавления бессвинцовых припоев

Тип припоя	Состав (массовые части), %	Температура плавления, °С
1	2	3
Sn/Ag	Sn96,5/Ag3,5	221
Sn/Ag/Cu	Sn95,5/Ag4,0/Cu0,5	217–219
Sn/Cu	Sn99,3/Cu0,7	227
Sn/Ag/Cu/Sb	Sn96,2/Ag2,5/Cu0,8/Sb0,5	217–220

Окончание табл. 31

1	2	3
Sn/Ag/Bi	Sn91,8/Ag3,4/Bi4,8	200–216
Sn/Ag/Bi/Cu	Sn90/Ag2,0/Bi7,5/Cu0,5	198–212
Sn/Bi	Sn42/Bi58	138
Sn/Sb	Sn95/Sb5	232–240
In/Sb	In52/Sb48	118
Sn/Zn	Sn91/Zn9	199
Au/Sn	Au20/Sn80	280

Припой Sn/Ag (Sn96,5/Ag3,5). Данный припой обладает достаточной смачивающей способностью и прочностью. В некоторых источниках отмечаются его более высокие термоусталостные свойства по сравнению с оловянно-свинцовыми припоями. Повреждения, вызванные термической усталостью, усиливаются при повышенных температурах. В системе Sn/Pb относительно высокая растворимость в твердом состоянии свинца в олове и, наоборот, особенно при повышенных температурах, приводит к укрупнению зерна. Известно, что эти неоднородные укрупненные зерна являются концентраторами напряжений, приводящих к зарождению и развитию трещин. Имеются многочисленные подтверждения того, что микроструктуры такого типа в сплавах Sn/Pb разрушаются вследствие возникновения полосы укрупненных зерен, из которой начинается рост усталостных трещин. Для сравнения, в системе Sn/Ag растворимость серебра в олове невелика, что обеспечивает более высокую сопротивляемость к укрупнению зерна сплавов этой системы. В результате эвтектический припой Sn96,5/Ag3,5 обладает более стабильной однородной микроструктурой, что повышает надежность.

Хотя припой Sn96,5/Ag3,5 сам по себе обладает высокой стабильностью микроструктуры, при пайке поверхностей на основе меди из-за большего содержания олова (96,5 % по сравнению с 63 %) и более высокой температуры пайки увеличивается скорость диффузии меди в олово. При достижении соответствующей концентрации происходит образование и рост хрупкого интерметаллического соединения Cu6Sn5. Для снижения скорости диффузии и тем самым уменьшения проникновения меди в олово возможно использование других покрытий паяемых поверхностей, например, иммерсионного золота (трехслойное покрытие Au-Ni-Cu). Слой никеля толщиной

2 мкм играет роль эффективного диффузионного барьера, ограничивая проникновение меди в припой и образование хрупкого интерметаллического соединения Cu6Sn5.

Припой Sn/Ag/Cu (Sn95,5/Ag4,0/Cu0,5). Так как стойкость паяного соединения к механическим воздействиям уменьшается при температурах, близких к температуре плавления припоя, термоциклирование при повышенных температурах более опасно для оловянно-свинцовых (температура плавления 183 °C), чем высокотемпературных припоев. Температура плавления припоя Sn/Ag/Cu делает его идеально подходящим для пайки изделий с высокими рабочими температурами (до 175 °C). Что касается смачивания, припой Sn/Ag/Cu не так хорошо смачивает медные поверхности, как припой Sn/Pb при использовании распространенных флюсов. Однако образования качественных галтелей можно достичь при условии, что применяемые флюсы пригодны для пайки при высоких температурах. Пайка в азотной среде также улучшает смачивание при использовании флюсов, не требующих отмывки. Тест на растворение меди показал относительно высокую тенденцию растворять медь из покрытий и образовывать интерметаллическое соединение Cu_6Sn_5.

Припой Sn/Cu (Sn99,3/Cu0,7). Данный припой также может использоваться при пайке изделий, работающих при высоких температурах, например, в автомобильной промышленности. Это наиболее приемлемый вариант для предприятий, ищущих припои, не содержащие свинец и серебро. Предварительные испытания данного припоя выявили существенно лучшие усталостные свойства и предел ползучести по сравнению со стандартными оловянно-свинцовыми припоями. Однако припои Sn/Cu/X показали лучшие результаты при испытании на ползучесть.

Припой Sn/Ag/Cu/Sb (Sn96,2/Ag2,5/Cu0,8/Sb0,5). Механические характеристики и показатели надежности припоев данной системы схожи с характеристиками припоев системы Sn/Ag/Cu. Однако его применение вызывает некоторые опасения из-за содержания в нем токсичной сурьмы.

Припой Sn/Ag/Bi (Sn91,8/Ag3,4/Bi4,8). Вообще говоря, висмут добавляется в припои Sn/Ag/X в целях снижения температуры плавления. Еще одним преимуществом добавления висмута является более высокая прочность паяных соединений, что было показано при механических испытаниях. Данный припой был разработан Sandia National Labs. Испытания, проведенные Sandia, показали от-

сутствие повреждений электрических цепей печатных узлов (ПУ) с компонентами поверхностного монтажа после 10 000 циклов изменения температуры. Для испытания использовались компоненты PLCC68, S0IC24 и чип-конденсаторы 1206, установленные на стандартные платы из FR4. ПУ подвергались нагреванию от 0 до 100 °С со скоростью 10 °С/мин. После 5000 циклов не было обнаружено трещин или деформаций на разрезах платы. Эти результаты хорошо согласуются с данными, собранными Национальным центром технологий США (National Centre for Manufacturing Sciences, NCMS) в рамках проекта по пайке бессвинцовыми припоями, сообщавшими о высокой сопротивляемости припоя термической усталости при использовании печатных плат с органическим защитным покрытием контактных площадок и сквозных отверстий.

Припой Sn/Ag/Bi/Cu (Sn90/Ag2,0/Bi7,5/Cu0,5). Хотя добавление висмута в систему Sn/Ag/X увеличивает прочность паяных соединений и улучшает смачивание, слишком большое содержание висмута (более 5 %) приводит к образованию двойной эвтектики Sn / Bi при 138 °С или тройной эвтектики Sn/Ag/Bi при 136,5 °С. Для припоя с содержанием висмута 7,5 % это соответствует примерно 1 % объема паяного соединения. При приближении температуры к 138 °С 1 % паяного соединения расплавится, что неминуемо скажется на надежности. Данная проблема вместе с недостатком, связанным с формированием соединения SnPbBi при 96 °С, делает этот припой маловероятным кандидатом для бессвицовой пайки.

Припой Sn/Bi (Sn_{42}/Bi_{58}). Низкая температура плавления данного припоя делает его пригодным для пайки термочувствительных компонентов и подложек. Если бы данный припой содержал свинец, то могло бы сформироваться эвтектическое соединение SnPbBi при 96 °С, что, в свою очередь, неблагоприятно сказалось бы на термоусталостных свойствах. В рамках исследовательского проекта пайки бессвинцовыми припоями Национального центра технологий США было заявлено о результатах испытаний на термоциклирование (0/100 °С, –55/+125 °С) с проведением 5000 циклов испытаний ПП с органическим защитным покрытием контактных площадок и сквозных отверстий. Результаты показали, что припой Sn/Bi превзошел припой Sn/Pb в обоих испытаниях. Однако предполагалось, что близость 125 °С к температуре двойной эвтектики Sn/Bi, равной 138 °С, приведет к неудовлетворительным результатам. Было предложено два вероятных объяснения этого неожиданного результата. Возможно, сплав Sn/Bi подвергается отжигу при температуре 125 °С,

уменьшающему напряжения, возникающие при термоциклировании. Второе объяснение заключается в претерпевании сплавом рекристаллизации. Кроме того, не наблюдалось образование высокой галтели по причине эвтектической природы сплава.

Припой Sn/Sb(Sn95/Sb5). Припой 95Sn/5Sb – это твердый раствор сурьмы в олове. Относительно высокая температура плавления данного припоя делает его пригодным для применения в качестве высокотемпературного. Сурьма придает прочность и твердость. При сравнении пределов текучести различных припоев было обнаружено, что предел текучести припоя Sn/Sb составляет 37,2 МПа и почти равен значению, показанному припоем Sn/Ag (37,7 МПа). Высокий предел текучести данного сплава приводит к тому, что в случае тонкого интерметаллического соединения трещина развивается по границе припоя с интерметаллическим соединением – пути, требующему минимальных затрат энергии. Повышение толщины интерметаллического соединения приводит к прохождению трещины сквозь интерметаллид. Образование интерметаллического соединения SbSn возможно при таком уровне содержания Sb. Эта фаза имеет кубическую структуру с высокой твердостью. Испытания на смачивание проводились при использовании RMA-флюса. Смачивание припоем Sn95/Sb5 медной проволоки при испытании в течение 2 с значительно меньше, чем припоями Sn63/Pb37 и Sn96,5/Ag3,5. Помимо низкой смачивающей способности, токсичность сурьмы также вызывает опасения. Как и висмут, сурьма является побочным продуктом при производстве свинца.

Припой In/Sn (In52/Sb48). Данный припой относится к низкотемпературным припоям. Благодаря содержанию индия он обладает высокой стойкостью к окислению, однако склонен к коррозии в среде с высокой влажностью. Более того, это очень мягкий металл. К тому же сплав In52/Sn48 обладает довольно низкими термоусталостными свойствами по причине низкой температуры плавления. Высокое содержание индия в этом припое препятствует его широкому применению из-за стоимости и ограниченной доступности.

Припой Sn/Zn (Sn91/Zn9). Наличие цинка в припоях приводит к окислению и коррозии. Слитки из этих сплавов, подвергавшиеся воздействию пара в течение 8 ч, сильно корродировали, о чем свидетельствовал багрянистый цвет поверхности. Припой в форме порошка интенсивно реагирует с кислотами и щелочами с образованием газов. Известно, что цинкосодержащие припои вступают в реакцию с флюсом, что со временем приводит к отвердеванию пасты.

Таким образом, совместимость с флюсами и продолжительность срока хранения данного припоя находится под вопросом. При пайке оплавлением припой Sn/Zn не продемонстрировал достаточно высокую смачивающую способность, показанную другими бессвинцовыми припоями. При пайке волной припоя наблюдалась тенденция к образованию большого количества шлама. Следовательно, возможность промышленного применения данного припоя и цинкосодержащих припоев в целом сомнительна.

Припой Au/Sn (Au20/Sn80). Эвтектический припой Au/Sn образует паяные соединения, отличающиеся высокой твердостью благодаря формированию хрупкого интерметаллического соединения. Однако были обнаружены проблемы, связанные с растрескиванием при пайке данным припоем. Не установлено, возникает ли растрескивание во время сборки ПУ или термоциклирования. Высокая цена данного припоя ограничивает его применение в тех случаях, когда издержки являются сдерживающим фактором.

Бессвинцовая пайка практически ничем, кроме более высокой температуры, не отличается от традиционной Sn/Pb-технологии. Однако могут потребоваться некоторые изменения на определенных операциях техпроцесса. Так, например, новые типы припоев и флюсов могут повлиять на характеристики паяльной пасты. Могут измениться такие свойства паст, как срок службы и хранения, текучесть, что потребует изменения конструкции ракеля и режимов оплавления.

Под воздействием повышенной температуры пайки может произойти вспучивание корпусов микросхем, растрескивание кристаллов, нарушение функционирования схем. Схожие эффекты возникают и в печатных платах. Под действием температуры происходит расслоение основания, ухудшается плоскостность, что отрицательно сказывается на точности установки микросхем, особенно в корпусах больших размеров. Большинство компонентов совместимо с температурным режимом бессвинцовой пайки. Исключение составляют некоторые типы интегральных схем, конденсаторов и разъемов, предельная температура пайки для которых не должна превышать 225–230 °С.

Что касается оплавления, то основные изменения связаны, в первую очередь, с более высокой температурой пайки. Требуется более тщательный выбор компонентов и материалов основания платы. Другие проблемы касаются охлаждения устройства и поддержки платы. Особенно чувствительны к скорости охлаждения многокомпонентные сплавы, содержащие более двух металлов.

В таких припоях могут образовываться различные интерметаллические соединения в зависимости от скорости охлаждения. Повышенная температура пайки может привести к кристаллизации остатков флюса, что затруднит отмывку печатных узлов после пайки.

Внешний вид паяного соединения при пайке бессвинцовым припоем весьма сильно отличается от традиционного. Для оценки качества паяных соединений, полученных с использованием бессвинцовых припоев, возможно, потребуется разработать новые критерии.

При монтаже плат больших размеров с массивными компонентами необходимо либо увеличивать время воздействия температуры, либо повышать температуру пайки, что следует учитывать при выборе компонентов и материалов печатных плат. При пайке бессвинцовыми припоями компонентов с выводами, покрытыми Sn/Pb, могут образовываться шарики припоя.

В Швеции была проведена серия испытаний с целью выяснения влияния различных факторов на технологический процесс пайки.

Испытания на растекаемость припоя проводились в различных средах, при различных температурах пайки и длительности нахождения припоя в жидком состоянии. При этом методом трафаретной печати наносилось одинаковое количество паяльной пасты на медную поверхность. Объем паяльной пасты определялся исходя из толщины трафарета и диаметра отверстий в нем. Далее производилось оплавление припоя, и затем измерялась площадь, покрытая припоем.

Не стоит забывать, что результаты теста на растекаемость припоя нельзя напрямую распространять на пайку компонентов, установленных на ПП, потому что пайка ПУ – это взаимодействие паяльной пасты с выводами компонентов и контактными площадками ПП, среды и профиля пайки, определяющее окончательный результат.

Тестирование было проведено для трех типов паяльных паст различных производителей с припоем Sn95,8/Ag3,5/Cu0,7 и флюсом, не требующим отмывки, наносимых с помощью металлических ракелей через металлический трафарет, изготовленный методом лазерной резки, толщиной 200 мкм с диаметром отверстий 4,93 мм. ПП, использованные во время испытаний, были изготовлены из FR4 и имели толщину 1,6 мм. Для обеспечения чистоты поверхности ПП и отсутствия на ней оксидов и других загрязнителей ПП подвергались предварительной очистке и полировке. На каждую ПП наносилось по шесть отпечатков пасты, затем производилась пайка в воздушной или азотной среде.

Во второй части испытаний исследовалась пайка ПП с установленными компонентами в воздушной и азотной среде с тем, чтобы выяснить влияние среды. При этом использовались компоненты и ПП с чистыми поверхностями и недавно изготовленная паяльная паста. Материал, из которого были изготовлены ПП, толщиной 1,6 мм, – FR4, контактные площадки имели покрытие Ni/Au. Толщина трафарета, через который наносилась паста, составляла 150 мкм, параметры технологического трафарета были таковы: скорость движения ракеля – 25 мм/с, давление ракеля – 1 кг/10 см ракеля. Перечень использованных компонентов приведен ниже (табл. 32).

Таблица 32

Перечень компонентов

Компонент	Покрытие выводов	Шаг выводов, мм
C1206	Sn бессвинцовое	–
S016	Бессвинцовое	1,27
QFP	SnPb	0,5
BGA225	SnPb шариковые выводы	1,5

Испытания припоя на растекаемость и исследование пайки компонентов, установленных на ПП, ясно показали, что при использовании припоя Sn/Ag/Cu смачивание поверхностей улучшается в случае пайки в среде азота. Смачивание выводов некоторых компонентов при пайке в воздушной среде было признано неудовлетворяющим требованиям стандартов IPC. Так как в исследованиях были использованы недавно изготовленные компоненты и паяльная паста, ожидается, что влияние среды, в которой производится пайка, может быть еще более существенным, если паяемость контактных площадок ПП или выводов компонентов снизится из-за длительного хранения.

Что касается паяльной пасты, то перед ее использованием необходимо убедиться в отсутствии серьезного ухудшения качества, например, из-за поглощения пастой большого объема влаги или высыхания. Установлено, что результаты, показанные паяльными пастами разных производителей при одних и тех же условиях, различны, но все они улучшаются при пайке в азотной среде.

Было показано, что при одних и тех же условиях время нахождения припоя в жидком состоянии может быть уменьшено примерно на 16 % при пайке в азотной среде. При пайке в азотной среде достигнуто такое же смачивание, что и в воздушной среде. Это приводит к сокращению времени цикла и, следовательно, к увеличению производительности.

В идеале при пайке ПП с установленными компонентами все компоненты и отпечатки паяльной пастой должны достичь одинаковой температуры в одно и то же время. На практике дело обстоит не так. На нагрев крупных компонентов требуется больше энергии, чем на нагрев мелких, и, следовательно, достижение заданной температуры происходит дольше. Другие факторы, влияющие на разницу температуры по поверхности ПП, включают в себя топологию ПП, теплоотвод, эффективность и постоянство передачи тепла от печи к ПП, отличие температуры на поверхности ПП от температуры на нагревателях. Часто это приводит к тому, что одинаковые компоненты, установленные в разных местах ПП, подвергаются различному температурному воздействию. Смачивание определит, будет ли сформировано качественное паяное соединение или нет. Это, в свою очередь, зависит от типа компонентов и металлизации контактных площадок ПП, состояния поверхности выводов компонентов и контактных площадок, паяльной пасты и ее состояния, не говоря уже о многих других факторах.

4.3.8. Пайка конструкционных материалов

Пайка, как и сварка, предназначена для неразъемных соединений заготовок. Особенность пайки состоит в применении припоя, имеющего температуру плавления ниже температуры плавления материала припаиваемых частей. При пайке основной металл твердый, а припой расплавлен. Части заготовки соединяются вследствие смачивания, взаимного растворения и диффузии припоя и основного материала в зоне шва. Для диффузии необходимо, чтобы припаиваемые поверхности были очищены, особенно от пленок оксидов, и защищены от окисления. Для защиты от окисления при пайке служат флюсы.

Паять можно углеродистую и легированную стали всех марок: твердые сплавы, ковкие и серые чугуны, а также цветные металлы и их сплавы. Можно также паять разнородные материалы (например, сталь с твердыми сплавами, керамику, пластмассы).

Паяльные маски для наружных слоев печатных плат

Введение в конструкцию ПП паяльной маски является необходимым условием, так как обычная стекло-эпоксидная основа печатных плат не обладает достаточной теплостойкостью при температурах пайки (220–240 °С) и без паяльной маски за время, необходимое для проведения техпроцесса пайки (0,5–2,5 мин), может происходить поверхностная деструкция материала диэлектрика.

По методу формирования рисунка паяльные маски делятся на два типа:

• рисунок формируется методом трафаретной печати. Как правило, это составы на эпоксидной основе, отверждаемые термически или ультрафиолетовым излучением; при относительной дешевизне основным их недостатком является низкая разрешающая способность и необходимость использования сеткографического трафарета;

• рисунок формируется фотолитографическим методом (фоторезистивные паяльные маски). Эти паяльные маски позволяют формировать рисунок любой сложности, в последнее время они получили наибольшее распространение. Фоторезистивные паяльные маски по методу нанесения делятся на сухие и жидкие.

Для нанесения паяемого покрытия на медную поверхность проводников ПП применяют несколько способов. Один из них – наиболее популярный метод – лужение с выравниванием припоя горячим воздухом (HAL, HASL).

При позитивном методе изготовления наружных слоев ПП перед нанесением расплавленного припоя после травления меди с пробельных мест удаляется олово-свинец со всех металлизированных поверхностей. Далее паяльная маска наносится на чистые медные проводники. Потом формируется рисунок защитного слоя, и вся ПП окунается в расплавленный 63/37 припой, который наносится на все поверхности, свободные от паяльной маски, – монтажные контактные площадки. Маршрутная схема процесса нанесения паяльной маски приведена на рис. 75.

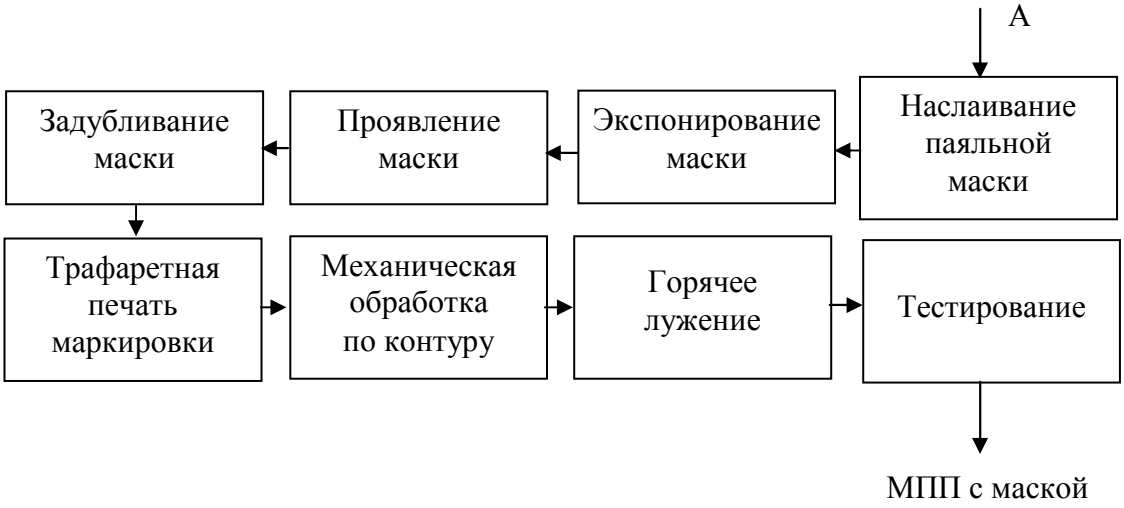


Рис. 75. Маршрутная блок-схема нанесения паяльной маски, маркировки, лужения и финишного контроля МПП

Многие российские производители ПП пытаются приспособить старую технологию оплавления металлорезиста олово-свинец для обеспечения хорошей паяемости покрытия и последующего нанесения паяльной маски. При этом они неизбежно сталкиваются с проблемами растрескивания и отслаивания паяльной маски от блестящей поверхности припоя или растекания припоя под паяльной маской при автоматизированном монтаже при пайке волной.

При тентинг-методе после травления рисунка операция снятия металлорезиста отсутствует, так как все проводники чисто медные. Поэтому одно из преимуществ этой технологии и лужения с выравниванием припоя в том, что уменьшается количество шагов обработки. Другое преимущество заключается в том, что припой не подвергается дополнительной химической обработке, которая могла бы загрязнить поверхность или изменить состав сплава. Кроме того, здесь меньше термических воздействий, способных вызвать рост интерметаллидов. Контактные площадки после этого процесса имеют отличную способность к смачиванию.

Альтернативы горячему лужению с выравниванием воздухом

Металлические покрытия:

- иммерсионное золото поверх химического никеля;
- иммерсионное серебро;
- химический палладий;
- иммерсионное олово;
- иммерсионный палладий;
- химическое золото поверх никеля.

Иммерсионная металлизация всегда себя ограничивает и обычно очень тонкая. Для изготовителя ПП ванны иммерсионной металлизации обычно значительно легче, чем ванны химической металлизации. Благодаря физическим свойствам золота металлизация никель-золото (Ni/Au) стала очень полезной обработкой поверхности.

В любой электрической схеме, где сопротивление коррозии или снашиванию вызывает беспокойство, обычно используется золото в качестве предпочтительного финишного покрытия. Обычный метод применения золота в ПП – электрометаллизация. Для того, чтобы осуществить электропокрытие металла, все области

должны быть электрически связанными вместе (на одной шине или шунтированные), чтобы позволить ионам металла течь от анода к катоду. Золото в растворе электрически стимулируется анодом и осаждается на проводники ПП (катод). Хотя никель обеспечивает долговечность золота, его первичная функция в том, чтобы сформировать барьер между золотом и медью. Это предохраняет медь от миграции через пористый золотой слой.

Иммерсионное золочение и химическое никелирование обеспечивают плоские контактные площадки для поверхностного монтажа и дают хорошую, присущую золоту смачиваемость припоем. Скорость осаждения никеля – 12,5–17,0 мкм/ч. Толщина слоя золота – 0,05–0,2 мкм. С точки зрения популярности у изготовителей следующие покрытия чаще всего заказывают в ПП для поверхностного монтажа. Покрытия указываются в порядке популярности:

- оплавление олова-свинца;
- лужение с выравниванием припоя;
- золочение поверх никеля;
- покрытие лаковым флюсом.

4.4. Поверхностный монтаж радиоэлектронных средств

4.4.1. Основные понятия и определения

Технология монтажа электронных компонентов непосредственно на поверхность схемных плат называется поверхностным монтажом. Поверхностный монтаж (ПМ) позволяет повысить экономические параметры, так как позволяет в процессе конструирования РЭС уменьшить габариты, снизить расход материалов и энергии, объем и массу корпусов и стоек, в которых должны размещаться электронные системы, и следовательно, уменьшить площадь сооружений. Используя технику ПМ, можно создавать более быстродействующие, помехоустойчивые и надежные электронные средства.

Техника поверхностного монтажа компонентов появилась в конце XX в. и сейчас является наиболее перспективным средством повышения производительности труда при изготовлении схемных плат и улучшения их функциональных характеристик.

ПМ по сравнению с традиционными технологиями монтажа обладает важнейшим критерием прогрессивности, а именно, обеспечивает миниатюризацию аппаратуры при одновременном росте ее функциональной сложности.

Процесс ПМ охватывает позиционирование и установку компонентов, пайку, контроль, испытание и ремонт. Для успешного внедрения ПМ в производство современной микроэлектронной аппаратуры необходима увязка вопросов технологичности на этапах конструкторского проектирования изделий.

Благодаря малым размерам компонентов для поверхностного монтажа ПМ находит широкое применение.

Сложность процесса сборки в сочетании с недостаточной стандартизацией корпусов компонентов в начальный период освоения ПМ в известной мере ограничила распространение ПМ на область цифровой техники. Освоение смешанных вариантов монтажа компонентов в отверстии и на поверхности плат связано с потребностью в нетрадиционных способах сборки и монтажа, что пока еще затрудняет реализацию преимуществ новой техники.

Термин «технология поверхностного монтажа» является общим обозначением нового направления в области электроники, включающего и технику корпусирования компонентов. Навесные компоненты, предназначенные для ПМ, в основном намного меньше, чем их традиционные эквиваленты, монтируемые в отверстия. Вместо длинных выводов или штырьков, как у корпусов, монтируемых в отверстия, они имеют очень короткие выводы или просто внешние контактные площадки. Такие компоненты непосредственно закрепляются на верхней (или нижней) стороне коммутационной платы при совмещении их выводов или внешних контактов с контактными площадками.

Малые размеры компонентов для ПМ обеспечивают:

- более высокую плотность монтажа на единицу площади коммутационной платы и, следовательно, дают снижение массогабаритных показателей при том же уровне функциональных возможностей;
- увеличение числа выводов корпуса (например, пластмассовый кристаллоноситель PLCC имеет 84 вывода и, следовательно, повышение функциональных возможностей на единицу поверхности коммутационной платы).

В то же время появление компонентов для ПМ способствовало осуществлению и развитию процесса автоматизированной сборки. Но по мере перехода от простых чипов резисторов и конденсаторов к сложным корпусам ИС проблемы установки компонентов, пайки, проверки, испытаний и ремонта вылились в сложную систему технологических ограничений.

При этом появляется возможность уменьшить количество плат в проектируемом изделии, а выход годных в случае ПМ даже в первом приближении не уступает выходу годных изделий с монтажом в отверстия. Применение корпусов с короткими выводами или внешними контактными площадками способствует также уменьшению величины паразитных индуктивностей, что особенно важно в СВЧ-устройствах.

Кроме того, не требуются формовка и обрезка выводов, хотя обеспечение их компланарности все еще остается проблемой для PLCC с J-образными выводами и выводами в виде крыла чайки. Надежность электронных узлов с ПМ довольно высока, например, за счет того, что корпуса для ПМ более устойчивы к воздействию вибрации.

ПМ допускает высокоскоростную автоматическую установку компонентов с частотой появления дефектов (100–1000) $\cdot 10^{-6}$ в зависимости от сложности конструкции корпуса. Недостаток коммутационных плат (КП) для ПМ заключается в том, что они менее удобны, чем традиционные, для проверки, испытаний и ремонта. Многовыводные корпуса требуют проектирования узких коммутационных дорожек с малым шагом между ними, и если не оптимизированы условия пайки, могут возникнуть проблемы, связанные с образованием перемычек припоя между соседними проводящими дорожками и выводами. В любом случае существуют некоторые ограничения, налагаемые, например, в отдельных случаях на пайку компонентов волной припоя или погружением либо на методы пайки расплавлением дозированного припоя; для большинства коммутационных плат весьма трудно осуществить эффективную визуальную проверку качества пайки, поскольку выводы компонентов могут быть частично или полностью скрыты телом самого компонента; в то же время использование топологии платы, обеспечивающей осмотр каждого соединительного узла за пределами периметра корпуса компонента, неизбежно привело бы к неэффективному использованию рабочего поля платы. Таким образом, необходимо тщательно прорабатывать вопросы испытания изготовленных плат.

Проблема теплоотвода – по-видимому, одна из наиболее распространенных и трудных в количественной оценке для изделий с применением ПМ. Вследствие малого расстояния между компонентами количество тепла, выделяемого компонентами на единицу площади платы, существенно увеличивается. При разработке конструкции платы отвод тепла должен обязательно учитываться. Для улучшения теплоотвода можно использовать, например, платы на основе инвара (инвар – магнитный сплав, обладающий малым температурным коэффициентом линейного расширения), плакированного (плакирование – нанесение на металл методом горячей прокатки или прессования на поверхность тонкого слоя другого металла) медью, хотя они дороже и массивнее обычных стеклоэпоксидных плат, которые также используются в ПМ.

Несогласованность коэффициента теплового расширения контактирующих материалов платы и компонентов приводит реально к усталостным напряжениям и развитию дефектов в местах пайки вследствие постоянного термоциклирования. По этой причине на традиционных платах нецелесообразно монтировать компоненты в керамических корпусах с габаритами, превышающими 6 мм, а в процессе проектирования плат приходится принимать альтернативные решения.

Преимущества техники ПМ не могут быть оценены только прямым сопоставлением с экономическими показателями техники монтажа в отверстии. Стимулами развития и доказательством прав на существование ПМ являются уменьшение массо-габаритных показателей и увеличение функциональных возможностей аппаратуры. Успех внедрения техники ПМ зависит от рыночной конъюнктуры, краткосрочный экономический анализ не может служить надежной основой для принятия решения.

Чип-конденсаторы и чип-резисторы имеют огромные преимущества перед их аналогами для монтажа в отверстия:

- компоненты всех номиналов размещаются в корпусах только трех типоразмеров, чем обеспечивается эффективная стандартизация;
- стандартизация корпусов позволяет использовать быстродействующие автоматы с реальной производительностью более 10 000 компонентов в час;

• пайка волной припоя (хорошо известная и давно освоенная технология) может быть эффективно использована для технологии ПМ.

Сложные корпуса требуют нетрадиционных процессов монтажа на коммутационные платы с использованием припойной пасты, наносимой методом трафаретной печати, и пайки расплавлением дозированного припоя. Процессы, лежащие в основе этих технологических операций, еще до конца не изучены, и при их реализации не всегда достигается высокий уровень качества при высоком выходе годных изделий, что, в общем-то, уже достигнуто на этапе размещения компонентов.

4.4.2. Компоненты и корпуса

В 80-х гг. прошлого века появились БИС в новых корпусах типа SOIC (Small Outline Integrated Circuit) и в пластмассовых кристаллоносителях PLCC (Plastic Leaded Chip Corrier), которые благодаря субмикронной технологии их изготовления обеспечивали небывалые функциональные возможности и быстродействие. Потенциальные возможности БИС в таком конструктивном исполнении вызвали повышенный интерес у разработчиков цифровых устройств, что послужило толчком к массовому внедрению ПМ в производство электронных изделий для вычислительной техники. По тем же причинам перспективными компонентами являются кристаллодержатели на гибкой ленте-носителе типа TAB (Tape Automatic Bonding).

Подразделяют следующие виды корпусов для ПМ:

1. Простые корпуса для пассивных компонентов:

• безвыводные корпуса прямоугольной формы, например: резисторов и конденсаторов;

• корпуса типа MELF (Metal Electrode Face Bonded);

• с монтированными электродами в виде металлизированных торцов.

2. Сложные корпуса для многовыводных полупроводниковых приборов:

• малогабаритный транзисторный корпус (Small Outline Transistor – SOT);

• малогабаритный корпус (Small Outline – SO) для интегральных схем;

• увеличенный малогабаритный корпус (Small Outline Lage – SOL) для интегральных схем;

• пластмассовые кристаллоносители с выводами (Plastic Leaded Chip Carrier – PLCC);

• безвыводные керамические кристаллоносители (Lidless Ceramic Chip Carrier – LCCC);

• керамические кристаллоносители с выводами (Leacfed Ceramic Chip Carrier – LDCC).

3. Различные нестандартные корпуса для компонентов неправильной формы, например, индуктивностей и переключателей.

Существуют также другие типы конструкций корпусов.

Рассмотрим более подробно простые корпуса.

Безвыводный корпус прямоугольной формы, или чипы (рис. 76), является наиболее распространенным типом корпусов для поверхностного монтажа пассивных компонентов, например, резисторов и конденсаторов. Они различаются стоимостью, габаритными размерами, рабочим напряжением и материалом диэлектрика (у чип-конденсаторов). Для указания геометрических размеров таких корпусов используется краткая форма обозначения, например,1206 означает, что компонент имеет длину 0,12 дюйма (3,048 мм) и ширину 0,06 дюйма (1,524 мм). При монтаже прямоугольных чипов особое внимание следует уделять решению проблемы их пайки на коммутационные платы. Очень важно выбрать правильную топологию контактных площадок, которая зависит от метода пайки, т.е. применяется ли пайка расплавлением дозированного припоя. Необходимо также учитывать в разработках материалы выводных контактных площадок чипов, что связано с решением серьезных проблем, например, для предотвращения выщелачивания серебра контактных площадок чипа в процессе пайки рекомендуется предварительно покрыть их никелем, выполняющим роль защитного барьера при пайке. Слои материалов на контактных площадках чипов в этом случае должны располагаться (начиная изнутри) в последовательности: серебро, никель, припой (например, 60/40, 63/37) или олово, палладий, серебро (62/36/2); следует отдавать предпочтение луженым контактам перед нелужеными.

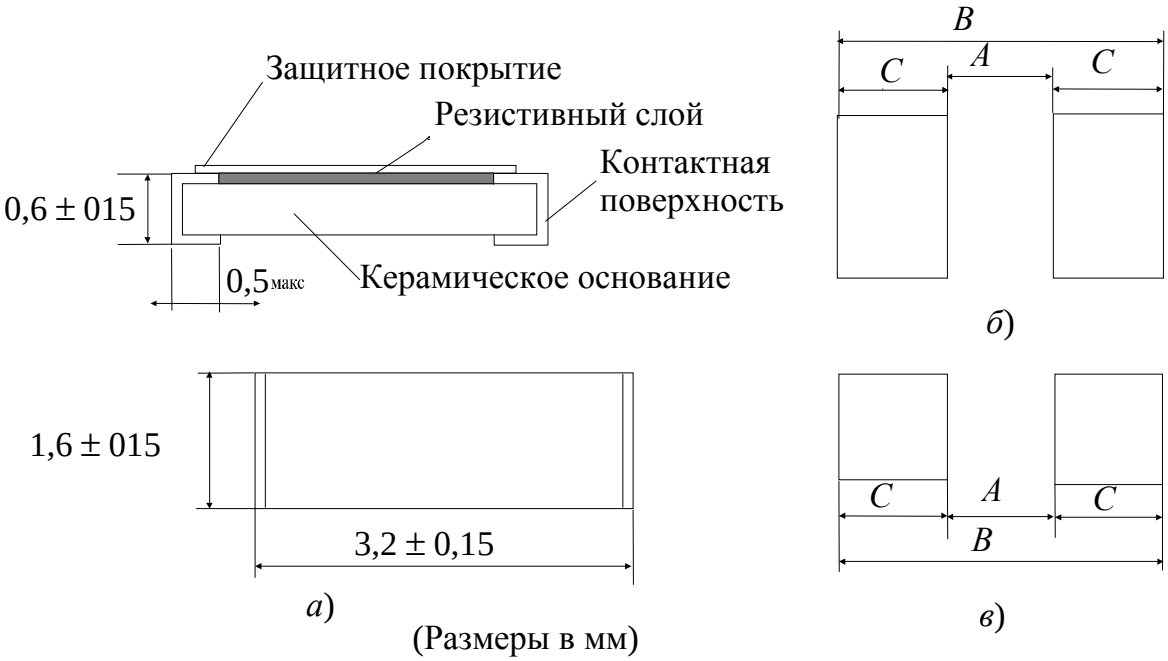


Рис. 76. Конструкция простого корпуса чипа для ПМ:

а – конструкция и габаритные размеры прямоугольных чипов;
б – знакоместо резисторов и многослойных керамических конденсаторов для ПМ в случае пайки методами расплавления дозированного припоя;
в – знакоместо резисторов и многослойных керамических конденсаторов для ПМ в случае пайки волной припоя

Большая часть чип-резисторов изготавливается методами толстопленочной технологии, которая включает отжиг смесей оксидов металлов и керамики (или стекла), нанесенные на керамические подложки с применением, например, шелкографии. Аналогично изготавливаются контактные площадки резисторов. Тело резисторов нередко покрывается пассивирующим слоем стекла. После лазерной подгонки (для получения требуемой величины сопротивления) и покрытия эпоксидным составом подложки разрезаются на отдельные чип-резисторы. Некоторые компании производят для специальных применений чип-резисторы на основе тонких пленок никеля и хрома.

Другой разновидностью элементов для поверхностного монтажа являются компоненты в корпусе типа MELF (Metal Electrode Face Bonded), который напоминает слегка измененный, безвыводный вариант стандартного резистора или конденсатора с выводами. В корпусах типа MELF изготавливают кремниевые диоды, высокочастотные катушки индуктивности с постоянной индуктивностью, танталовые конденсаторы и устройства защиты от перенапряжений,

но в наибольших объемах производятся керамические конденсаторы и графитовые пленочные резисторы.

Корпус MELF имеет несколько преимуществ, основным из них является низкая стоимость, по меньшей мере сравнимая со стоимостью эквивалентных компонентов с проволочными выводами. Стандартные типоразмеры MELF обычно рассчитаны на такую же топологию контактных площадок, что и компоненты с выводами. По электрическим характеристикам они могут превосходить компоненты с выводами (нет паразитной емкости, индуктивности) (рис. 77).

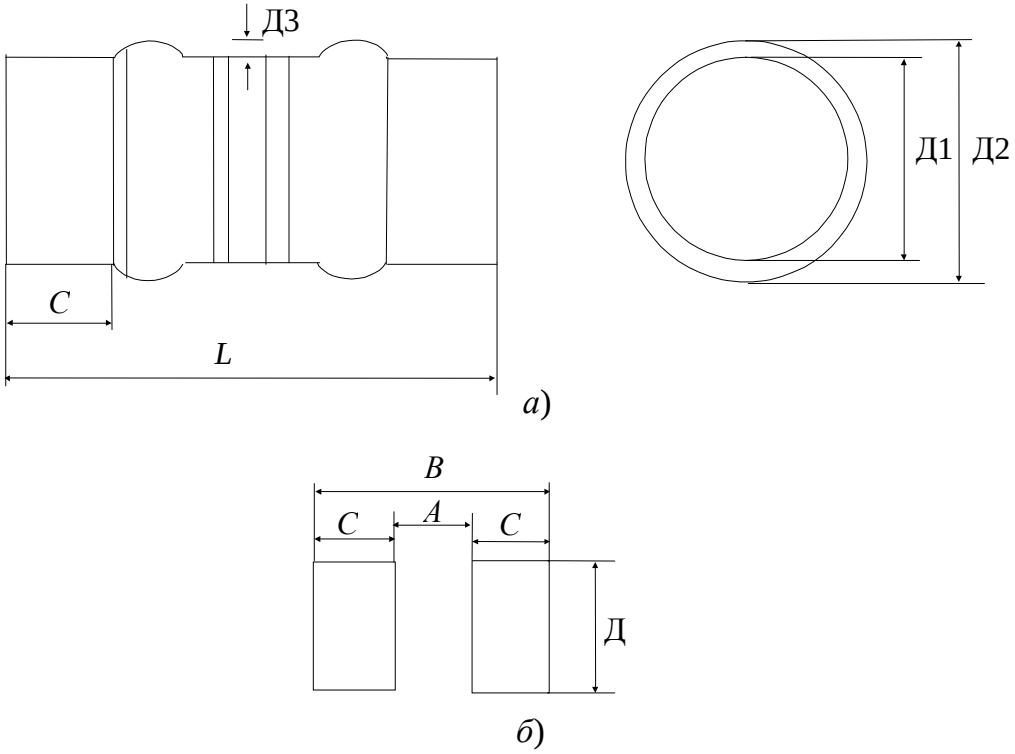


Рис. 77. Конструкция корпусов MELF:
а – размеры резисторов в корпусе MELF; *б* – знакоместа корпуса SO-80 диода

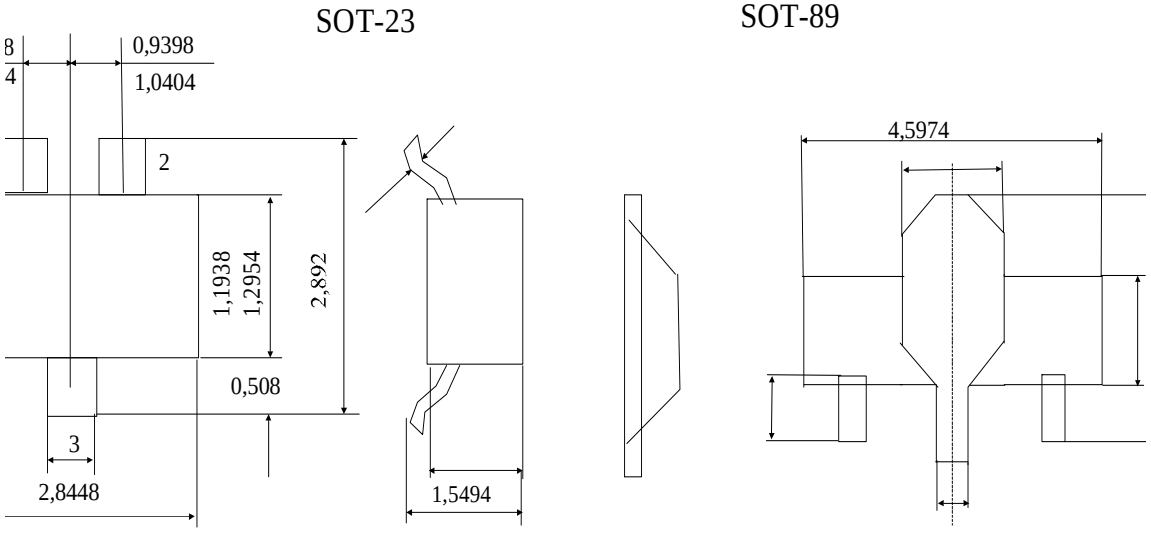
Установка многих корпусов типа MELF может быть затруднена в случае, если компонент не контактирует с адгезивом в своей средней точке. Конструкция корпуса MELF имеет весьма незначительную контактную зону с каплей адгезива, имеющей в основном форму полусферы. При использовании корпуса типа SOD-80 (корпус цилиндрической формы, подобной MELF) погрешность позиционирования 0,5 мм приводит к уменьшению эффективной поса-

дочной длины компонента до 4,064 мм, что по мнению специалистов неприемлемо.

Уменьшение контактной зоны компонента с адгезивом увеличивает вероятность смещения корпуса MELF с места установки до отверждения адгезива, особенно если плата со сборкой в момент отверждения не находится точно в горизонтальном положении.

Сложные корпуса имеют следующие конструкции.

На рис. 78 представлена конструкция транзисторного миникорпуса, применяемого для корпусирования дискретных полупроводниковых приборов. Имеется два стандартных корпуса, которые можно использовать для герметизации простых полупроводниковых приборов – транзисторов, диодов, стабилитронов и др. Это корпуса ТО-236 (SOT-23) и ТО-243 (SOT-89). Выбор типа корпуса зависит от мощности, рассеиваемой прибором, и реального размера полупроводникового кристалла. ТО-236 применяется для кристаллов площадью до 0,030 дюйм^2 (19,35 мм^2) с помощью 200 мВТ при 25 ^{o}С. Второй корпус – ТО-243 – рассчитан на кристалл площадью 0,060 дюйм^2 (38,70мм^2) с рассеиваемой мощностью до 500 мВТ при 25 ^{o}С.



а) *б*)

(Размеры даны в мм)

Рис. 78. Конструкция корпусов SOT:
а – размеры корпуса SOT-23; *б* – размеры корпуса SOT-89

Оба корпуса имеют очень простую конструкцию с тремя выводами: у ТО-236 выводы поочередно отходят от каждой из сторон, в то время как у ТО-236 они расположены по одну и ту же сторону корпуса, а центральный вывод имеет увеличенный размер для лучшего отвода тепла.

В разработке подобных корпусов для одиночных приборов прослеживается тенденция к повышению уровня рассеиваемой мощности, с тем чтобы в конечном счете можно было непосредственно помещать в такие корпуса для поверхностного монтажа мощные приборы, как, например, переключающие транзисторы и выпрямители, без каких-либо особых изменений конструкции платы с целью улучшения ее теплоотвода.

Интегральная схема в мини-корпусе SO/SOL (SO – Small Outline; SOL – Small Outline Large) напоминает уменьшенный вариант традиционного корпуса с двухрядным расположением ленточных выводов (типа DIP). Обычно мини-корпуса поставляются в 8-, 14- и 16-выводном исполнении, при этом выводы имеют форму крыла чайки и расположены с шагом 1,27 мм (рис. 79). Большим преимуществом этого хорошо освоенного корпуса являются улучшенные значения основных массогабаритных характеристик по сравнению с его аналогом DIP (обычный корпус 155 серии): он на 70 % меньше по объему, на 30 % меньше по высоте, а масса такого корпуса составляет всего лишь 10 % массы его более крупного аналога, если сравнить 14-выводные корпуса. Кроме того, мини-корпус имеет лучшие электрические характеристики, определяющие скорость прохождения сигнала. К тому же для переработки топологии обычной схемы на DIP-корпусах в вариант с использованием SO/SOL-корпусов нужно ввести лишь небольшие изменения, так как разводка выводов одинакова, но общий размер платы может быть уменьшен.

В настоящее время в этом корпусе выпускается большинство типов ИС как малой, так и средней степени интеграции, включая стандартные промышленные аналоговые и цифровые схемы, выполненные по ТТЛ-технологии и КМОП-технологии.

Стандартный мини-корпус типа SO имеет ширину 3,81 мм. Существует также совершенно аналогичный корпус, называемый «увеличенным вариантом» – SOL, который имеет ширину 7,62 мм. Количество выводов у этих корпусов колеблется от 16 до 28.

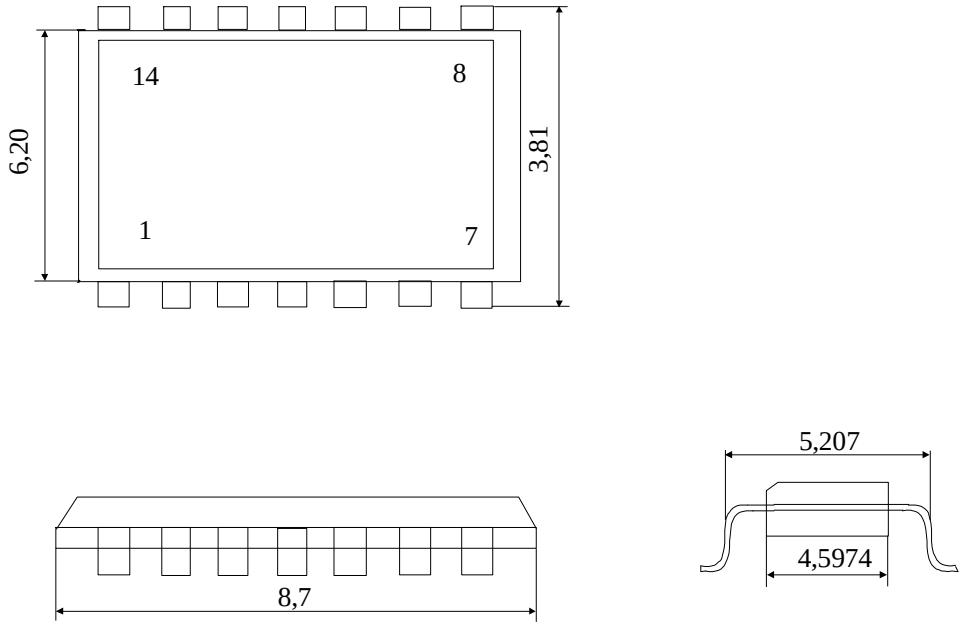


Рис. 79. Корпуса интегральных схем типа SO

Рассмотрим пластмассовый кристаллоноситель с выводами PLCC (Plastic Leaded Chip Carrier), который имеет выводы, размещенные по всем четырем сторонам корпуса, и обеспечивает непревзойденные функциональные возможности в пересчете на один квадратный сантиметр площади коммутационной платы, чем, собственно, и объясняется его возрастная популярность у потребителя. PLCC (рис. 80) – наглядный представитель следующего, более высокого уровня конструктивной сложности компонента по сравнению с корпусом типа SO, который, как правило, не используется для кристаллов с количеством выводов более 28. Проекция PLCC представляет собой почти правильный квадрат и имеет обычно от 18 до 84 выводов, хотя в ряде исполнения 18-выводный вариант имеет форму прямоугольника. Шаг выводов у PLCC обычно составляет 0,050 или 0,025 дюйма (1,27 или 0,635 мм), однако для некоторых сложных СБИС употребляется также шаг 0,020 (0,508 мм).

Варианты конструкции PLCC с числом выводов до 52 имеют, как, правило, гибкие выводы, загибаемые под корпус при монтаже; такая конфигурация выводов весьма удобна для массового производства, поскольку тем самым исключается повреждение корпуса при обращении с ним и обеспечивается возможность автоматизации монтажа, так как компоненты поставляются упакованными на гибкой ленте. Однако не полностью решенной остается проблема компланарности выводов, которая очень важна для обеспечения надежности изделия.

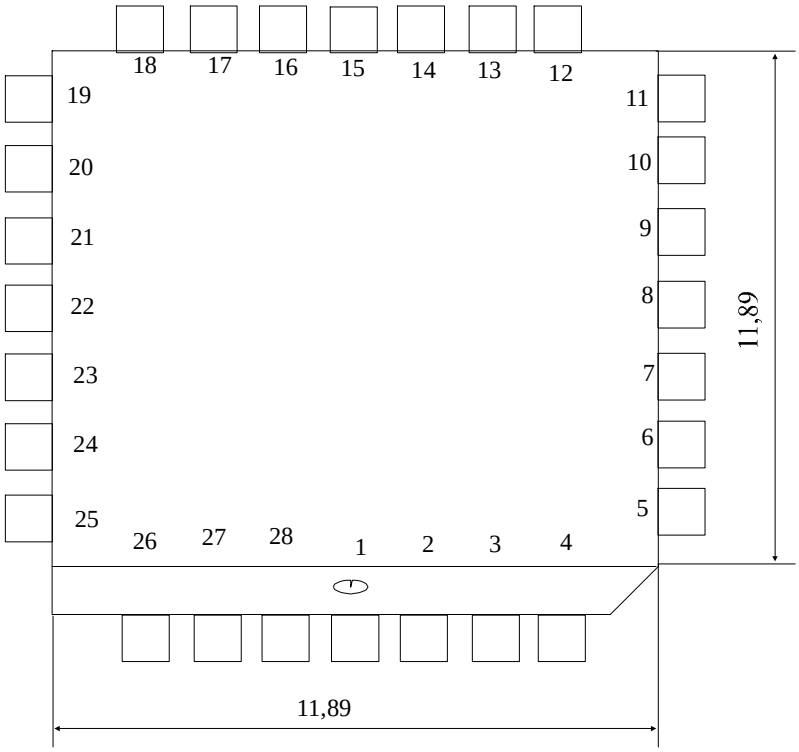


Рис. 80. Корпус PLCC

Безвыводные керамические кристаллоносители являются наиболее распространенными типами керамических корпусов (рис. 81) для поверхностного монтажа – LCCC (Leadless Ceramic Chip Carrier). Варианты конструкции LCCC содержат 18 и более выводов контактных площадок (существуют варианты с 20, 28, 44, 52, 68 и 84 выводами контактных площадок).

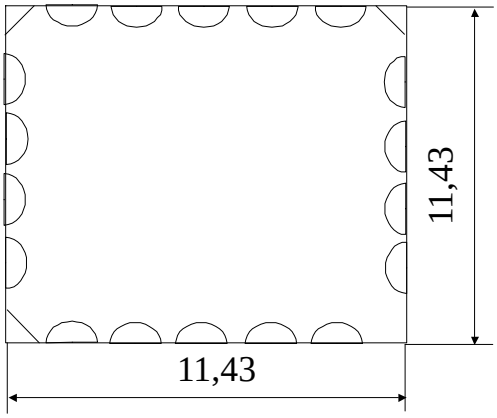


Рис. 81. Квадратные безвыводные
керамические кристаллоносители

Обычно корпус LCCC представляет собой конструкцию, состоящую из трех основных элементов: металлизированного керамического основания, металлической крышки и герметизированного материала, чаще всего специального припоя. Корпус имеет два ориентирующих ключа: один из них для оптического считывания, второй – в виде угловой фаски. Эти корпуса выбираются для ответственных применений, например, в военной техники, аппаратуре связи и аэрокосмической технике, поскольку они могут быть высокогерметичны.

Недостатки LCCC, в основном, связаны с рассогласованием температурных коэффициентов расширения корпуса и стандартной стеклоэпоксиадной платы, которое способствует образованию и развитию дефектов в местах пайки при жестком термоциклировании или высоком уровне рассеиваемой мощности. Лучше, чем эпоксидными, но все же далеко не идеально, LCCC согласуется по ТКР со всеми керамическими платами, которые находят ограниченное применение в технике поверхностного монтажа. Кроме того, эти корпуса относительно дороги в производстве.

Кристаллоносители с выводами (LDCC/CCC) позволяют решить проблему рассогласования ТКР, хотя они дороже, конструктивно более сложны и пригодны лишь для военной и других ответственных применений, где стоимость не является основным критерием выбора компонента.

4.4.3. Способы упаковки компонентов

Компоненты должны поставляться в такой форме упаковки, которая обеспечивает эффективную и дешевую сборку. Форма упаковки должна быть совместима с имеющимся сборочно-монтажным оборудованием. Изготовители автоматов-укладчиков компонентов в настоящее время внедряют стандарт на форму упаковки в виде гибкой ленты, рассчитанной на все типы корпусов, за исключением PLCC с выводами в форме крыла чайки, которые поставляются в магазинах типа ИС-шина. Применение ячеистых магазинов ограничено небольшими объемами монтажа данного компонента, а также теми случаями, когда потребитель не желает омертвлять капитал, т.е. не создает большого запаса компонентов.

Поставка россыпью не отвечает требованиям автоматического монтажа, за исключением чипов, не требующих контроля полярности. Поставка безвыводных корпусов россыпью, а корпусов с выводами, упакованных в ячеистые магазины, характерна для ремонтных станций.

Обычно применяются два типа ленты: бумажная и пластмассовая. В бумажной ленте вырубаются отверстия, в которых фиксируются компоненты; с обеих сторон бумажной ленты на компоненты накладывается прозрачная гибкая майларовая лента. Лента снабжена перфорированными отверстиями для подачи компонента в автомат. Относительно недорогие бумажные ленты имеют ряд недостатков: в результате истирания при размотке отделяются бумажные волокна, которые могут нарушить сборочно-монтажные операции. В отличие от бумажной пластмассовая лента имеет выпрессованные подушкообразные полости, в которых фиксируются компоненты. Дополнительную фиксацию осуществляют покровная лента из майлара.

Размеры катушек для лент установлены международным стандартом: их диаметр колеблется от 180 до 325 мм в зависимости от ширины ленты, которая в свою очередь меняется от 8 до 57 мм.

Техника ПМ революционизирует методы конструирования и изготовления коммутационных плат. Попытки обеспечить интенсивный теплоотвод объясняют появление большого количества новых пластмасс, керамических и композиционных материалов для плат. Становятся обычными коммутационными дорожками, имеющими ширину и шаг, равные 0,2 мм, а то и 0,127 мм. Большинство печатных плат, предназначенных для монтажа в отверстия, изготавливается по традиционной технологии и с шириной и шагом коммутационных дорожек 0,381–0,254 мм. Вместе с тем техника поверхностного монтажа предъявляет повышенные требования к электрофизическим характеристикам коммутационных плат; так, для традиционной платы допуск на полное сопротивление (электрический импеданс), равный ±25%, становится неприемлемым для плат ПМ, поскольку в последнем случае нужно стремиться получить величину допуска не более ±5 %. Это требует включения резистивных нагрузок в конструкцию самой платы.

Самым сложным является то, что на всех этапах технологического цикла допуски для плат должны составлять 0,0254–0,0508 мм.

Постоянно имеется компромисс между плотностью монтажа и эффективностью использования коммутационной платы, а именно: более высокая степень использования плат может служить как целям уменьшения размеров платы с тем же самым количеством коммутационных слов, так и целям повышения функциональной сложности изделий при сохранении размеров плат с одновременным увеличением числа слов. В обоих случаях в технологию изготовления плат должны вноситься изменения: миниатюризация отверстий и коммутационных дорожек, а также увеличение количества слов коммутации требуют повышения точности технологических процессов.

Размеры плат существенно ограничиваются характеристиками материалов, из которых они изготавливаются (платы больших размеров подвержены короблению в результате термообработок и для избежания этого их толщина должна быть соответственно увеличена). Кроме того, существуют ограничения размеров плат, связанных с технологической оснасткой и оборудованием, например, конструкция большинства монтажных и испытательных устройств разработана с учетом каких-то предельных размеров платы. И наконец, платы больших размеров затрудняют операции совмещения, сверления, электрического покрытия и пайки. Транспортная система также должна быть рассчитана на такие размеры, поэтому целесообразно по крайней мере выдерживать ширину плат.

Современный размер плат, используемых для ПМ, составляет 91,44×121,92 мм.

Техника поверхностного монтажа требует знаний физико-химических основ технологии, в частности, процессов установки компонентов и пайки. Исторически сложилось так, что механизм пайки волной припоя остается недостаточно хорошо изученным при реализации монтажа в отверстия, но это не оказало существенного влияния на другие этапы изготовления. В производстве микросборок методами ПМ на различных технологических этапах химические, термохимические и металлургические процессы тесно взаимосвязаны. Большинство инженеров-технологов недостаточно компетентны в этих областях знаний. Кроме того, приложение тео-

ретических основ технологии к процессам производства часто не в полной мере отражается в технологической документации.

Рассмотрим варианты реализации чисто поверхностного монтажа и монтажа смешанного. Выбор варианта во многом зависит как от особенностей конструкции технологической (сборочно-монтажной) линии, так и от других факторов, обычно учитываемых на стадии производства изделий.

Микросборки в ПМ отличаются от традиционных в нескольких отношениях:

1) корпуса компонентов для ПМ не закрепляются на поверхности платы с помощью выводов и поэтому нуждаются в механическом креплении на плате с помощью эпоксидных клеев или припойной пасты. После размещения компонентов на плате осуществляется отвержение эпоксидной смолы непосредственно перед пайкой;

2) пайка волной припоя применена только к простым корпусам компонентов для ПМ, устанавливаемых на обратной стороне платы, и к теплостойким компонентам. Компоненты на лицевой стороне платы должны припаиваться с применением одного из методов оплавления дозированного припоя: в паровой среде, с помощью ИК или лазерного нагрева;

3) при смешанных методах монтажа производственная линия должна включать манипуляторы для перевертывания плат и, как минимум, две установки пайки;

4) до проведения пайки изделия с компонентами должны перемещаться от операции к операции с использованием прецизионных автоматизированных транспортных средств со специальным накопителем, обеспечивающих целостность компонентов и сохранение их позиции на плате с высокой точностью.

Существует три основных варианта реализации ПМ:

- чисто поверхностный монтаж на плате (односторонней или двусторонней);
- смешанно-разнесенный вариант, когда традиционные компоненты размещают на лицевой стороне платы, а простые компоненты для ПМ – на обратной стороне;

• смешанный монтаж, например, на лицевой стороне платы, и поверхностный на обратной (когда традиционные компоненты и сложные компоненты для поверхностного монтажа размещают на лицевой стороне платы, а простые поверхностно монтируемые компоненты – на обратной стороне платы).

Чисто поверхностный монтаж имеет минимальное число технологических операций. На диэлектрическое основание платы наносят припойную пасту методами трафаретной печати. Количество припоя, наносимое на плату, должно обеспечивать требуемые электрофизические характеристики коммутирующих элементов (для чего необходим соответствующий контроль). После осуществления позиционирования и фиксации компонентов следует операция пайки оплавлением дозированного припоя с применением одного из методов, рассмотренных выше. В случае двустороннего ПМ на обратной стороне платы фиксируются простые компоненты с помощью адгезива. После отверждения адгезива компоненты подвергаются пайке двойной волной припоя, затем осуществляются очистка, контроль и испытание смонтированных плат (при необходимости платы переворачиваются).

Смешанно-разнесенный монтаж имеет две разновидности. Чаще всего сборку начинают с установки традиционных компонентов в отверстия платы, после чего размещают компоненты на поверхности платы (рис. 82). В альтернативном случае (рис. 83) сначала устанавливают компоненты на поверхность платы. Первый вариант применяют тогда, когда формовка и вырубка выводов обычных компонентов осуществляются с помощью специальных приспособлений заранее, иначе компоненты, смонтированные на поверхность платы, будут затруднять обрезку выводов, проходящих через отверстия плат. Компоненты для поверхностного монтажа целесообразно монтировать первыми при повышенной плотности их размещения, что требует минимального количества переворотов платы в процессе изготовления изделия. Установка традиционных компонентов и сложных компонентов для ПМ на лицевой стороне платы, а также простых компонентов на поверхность обратной стороны – наиболее сложная разновидность монтажа (рис. 84).

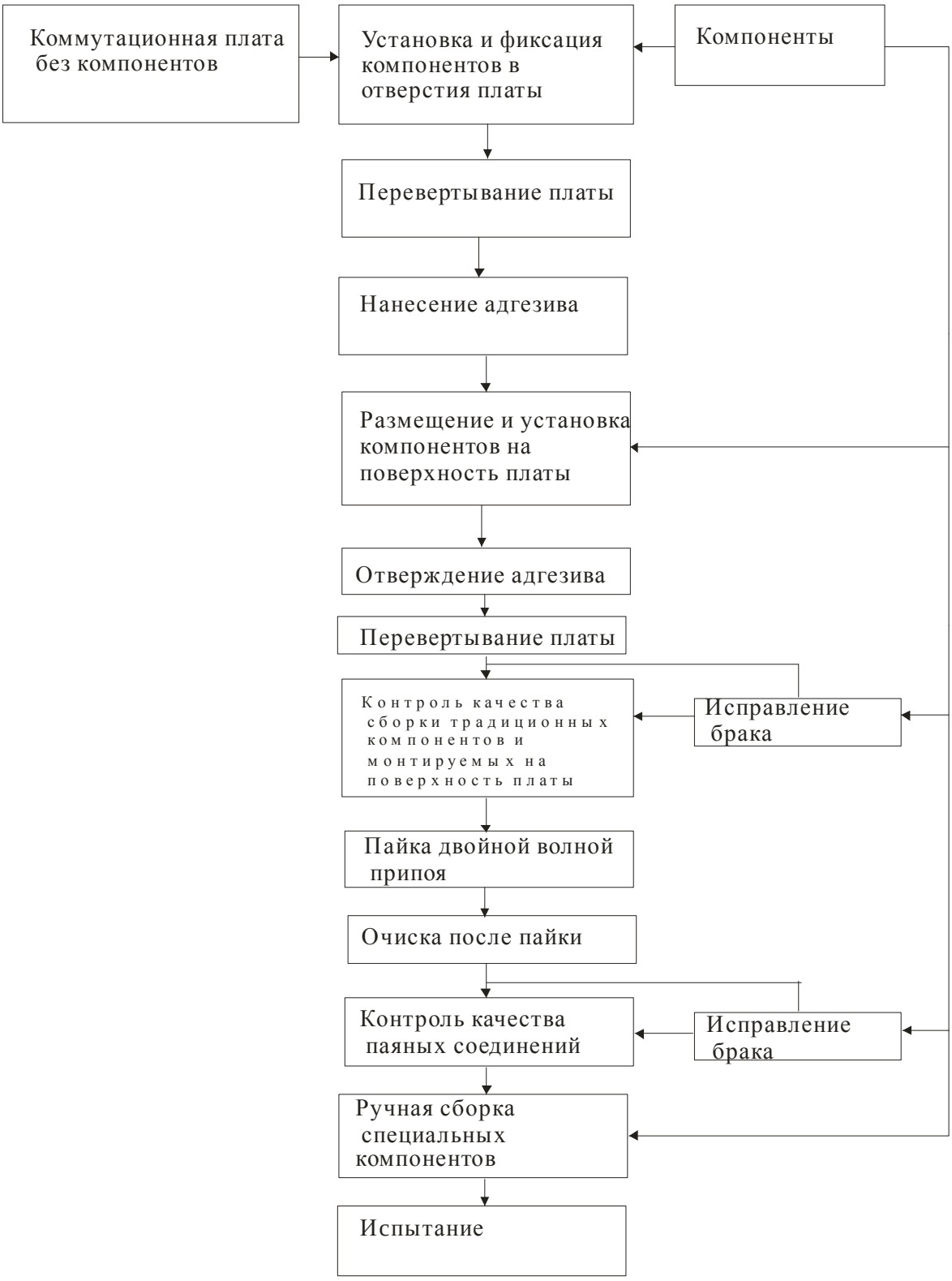


Рис. 82. Схема реализации процесса монтажа с использованием простых компонентов для монтажа на поверхность и компонентов для монтажа в отверстия платы (вариант 1)

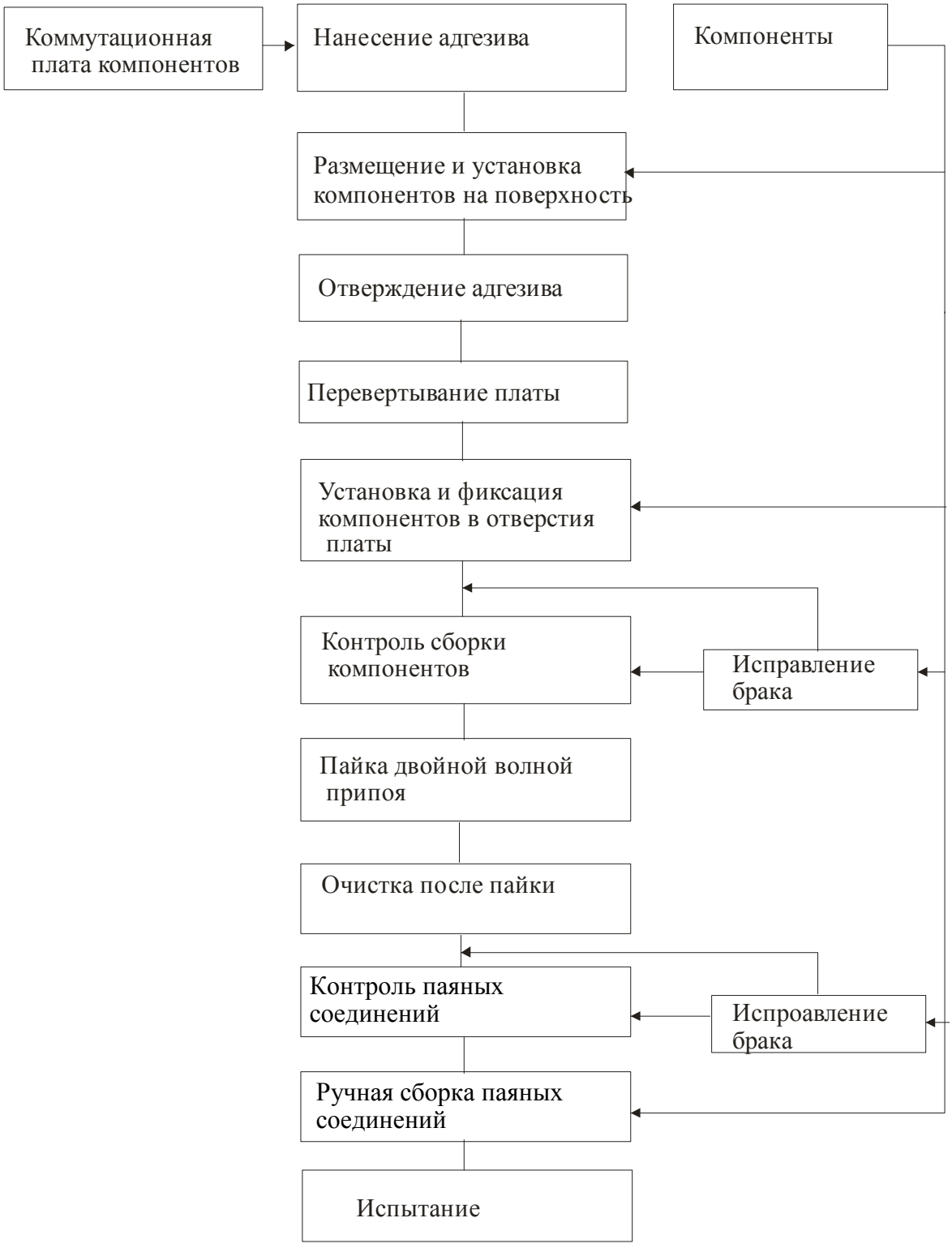


Рис. 83. Схема реализации монтажа простых компонентов на поверхность платы и компонентов, устанавливаемых в отверстия платы (вариант 2)



Рис. 84. Схема реализации монтажа традиционных компонентов, а также простых и сложных компонентов, устанавливаемых на поверхность платы

Первым этапом является нанесение припойной пасты через трафарет, установка на лицевой стороне платы сложных компонентов для поверхностного монтажа (SOIC, PLCC) и пайка расплавлением дозированного припоя; затем – установки традиционных компонентов (с соответствующей обрезкой и фиксацией выводов), плата переворачивается, на нее наносится адгезив, и устанавливаются компоненты простых форм для поверхностного монтажа (чип-компоненты и компоненты в корпусе SOT). Эти простые компоненты и выводы компонентов, установленных в отверстия, одновременно пропаиваются двойной волной припоя. Возможно также использование в составе одной линии оборудования, обеспечивающего эффективную пайку компонентов (с лицевой стороны платы) расплавлением дозированного припоя и пайки (с обратной стороны платы) волной припоя.

Следует отметить, что в таком ТП возрастает количество контрольных операций из-за сложности сборки при наличии компонентов на обеих сторонах платы. Неизбежно возрастают также количество паяных соединений и трудности обеспечения их качества. Это усложняет работу автоматического оборудования для контроля соединений, поскольку для этого требуется дополнительный переворот платы.

4.4.4. Выбор адгезивов

Выбор адгезива в ПМ на практике более труден, чем кажется на первый взгляд. Нередко бывает, что на первых порах освоения ПМ изготовленные адгезивы удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям, например, имеют достаточно высокую адгезионную способность и нужные диэлектрические свойства. Однако для серийного выпуска изделий эти адгезивы оказываются непригодными и требуется разработка новых, более совершенных клеевых композиций с минимальным выделением летучих веществ, хорошо совместимых с конструкционными и технологическими материалами изделий (например, с материалами корпуса компонента, с флюсом, припоем и др.) и имеющих режимы отверждения, приемлемые в технологии поверхностного монтажа. Немаловажно также обеспечить при этом устойчивость адгезивов к деградации в условиях термоциклических воздействий процесса пайки.

Выбор адгезива практически зависит от конкретного его применения в изделии с поверхностным монтажом. Вместе с тем надо учитывать специфические свойства адгезивов при обращении с ними. Так, например, адгезивы, представляющие собой однокомпонентные системы, обычно содержат растворитель, просты в использовании, не требуют смешивания ингредиентов, однако часто оказываются источниками летучих веществ, и это следует учитывать. Двухкомпонентные системы имеют длительный срок хранения, но их ингредиенты должны точно дозироваться.

Требования для выбора подходящего адгезива следующие:

• технологичность адгезивов при нанесении. Это в первую очередь определяется методом нанесения (трафаретная печать, перенос капли, дозировка шприцом). Принципиальным моментом является способность формирования в виде капли, заполняющей самый большой встречающийся в микросборке промежуток между компонентами и платой и в то же время не растекающейся из-под самих малогабаритных компонентов после нанесения;

• вязкость адгезивов. Должен быть относительно жидким для удобства нанесения из шприца при минимальном давлении и в то же время быть достаточно вязким, чтобы не вытекать самопроизвольно и не оставлять следы. Капля адгезива должна сохранять заданную высоту без растекания или миграции для надежного удерживания компонента до отверждения клеевого соединения, по меньшей мере, хотя бы на период транспортировки платы в установку отверждения адгезива;

• время отверждения адгезива. Однокомпонентные адгезивы отверждаются при температуре более 125 °С. Двухкомпонентные системы обычно отверждаются при более низких температурах, что менее опасно для монтируемого изделия с точки зрения повреждений материалов платы и компонентов. Процесс отверждения может иметь длительность до 10 мин (обычно 3–5 мин) при температуре 80–150 °С. Достаточно малое время термообработки изделия позволяет организовать поточный процесс производства. Хотя температура при пайке намного выше, чем при отверждении клеев, воздействие ее на изделие кратковременно (секунды) и не приводит к серьезным последствиям.

Для сокращения времени отверждения в некоторых случаях можно использовать обработку адгезива ультрафиолетовым (УФ) излучением или сочетать обычный нагрев с УФ-излучением. Однако отверждение с применением УФ излучения при наличии на плате крупногабаритных компонентов невозможно, поскольку такие компоненты загораживают капли адгезива от попадания на них излучения. Единственной альтернативой этому является использование нагрева инфракрасным излучением;

- усадка и выделение летучих веществ – во время отверждения и пайки. Применение современных адгезивов при оптимизации режимов их отверждения позволяет уменьшить вероятность этих явлений. Важно оптимизировать режим отверждения;

- свойства адгезива после отверждения – должна быть обеспечена неповреждаемость заполненных компонентами плат во время их транспортировки при монтаже.

Материалы, режимы пайки и последующей очистки изделий с ПМ не должны отрицательно влиять на прочность сцепления адгезива с материалами платы и затруднять или исключать ремонт изделий. После пайки долговременная механическая прочность соединения компонента с платой должна обеспечиваться в основном за счет пайки, а не приклеивания. В отдельных случаях допустимо использование адгезивов с малым временем жизни (быстросхватывающихся), адгезионная способность которых заметно ухудшается после пайки изделий. Однако в ответственных случаях этого следует избегать, поскольку любая непредвиденная задержка в технологическом цикле потребует дополнительной очистки платы и повторного формирования адгезивного соединения на плате.

4.5. Технология клеевых соединений

4.5.1. Применение клеев в производстве радиоэлектронных средств

Клеи – растворы, иногда расплавы как природных, так и искусственных высокомолекулярных веществ, применяющихся в приборостроении для соединения деталей, изготовленных из разнообразных материалов: пластмасс, металлов, бумаги, ткани, керамики и т.д.

Могут быть соединены как однотипные, так и разнотипные материалы, например: при изготовлении тензодатчиков и при их наклейке, для склеивания каркасов катушек, приклеивания стекла в оправу и полюсных наконечников к магниту, в полупроводниках для присоединения металлических выводов и в других случаях. В приборостроении также широко применяют липкие ленты как электроизолирующие, герметизирующие и предохраняющие. Клеевые соединения по сравнению с механическими соединениями сваркой, пайкой, заклепкой и винтовыми соединениями имеют следующие преимущества: возможность соединения самых разнообразных материалов, относительная простота и дешевизна технологии склейки, стойкость к коррозии, хорошие диэлектрические свойства и т.д. В настоящее время применяется большое количество различных клеев, которые в той или иной степени удовлетворяют перечисленным требованиям. Состав клеев: пленкообразующие – основа клеевого слоя (термореактивные и термопластичные смолы, каучуки и эфиры целлюлозы), растворители – для получения клея определенной вязкости, отвердители – для получения твердой нерастворимой термостабильной пленки (перекись бензола), наполнители – для уменьшения усадки клеевой пленки и повышения теплостойкости (цемент, графит и др.), пластификаторы – для повышения эластичности пленки, стабилизаторы – для сохранения консистенции клеев или их клеющих свойств. Клеи классифицируют по пленкообразующим, типу отверждения и по состоянию. По составу пленкообразующих принято различать клеи на основе: термопластичных смол, термореактивных смол, каучуков и эфиров целлюлозы. По типу отверждения различают клеи холодного и горячего отверждения. По состоянию различают жидкие клеи и твердые. Смоляные клеи марок БФ-2, БФ-4 и другие представляют собой растворы фенольно-формальдегидных смол.

Эти составы полимеризуются, т.е. переходят в неплавкое и нерастворимое состояние. Эти клеи обеспечивают соединениям прочность на скалывание до 130 кг/см^2, они устойчивы против влаги, кислот и температурных изменений, стойки против действия бензола, масла, грибка и при вибрациях. Применяют, главным образом, для склеивания металлических деталей между собой. Эпоксидные клеи в зависимости от состава разделяются на две группы: горячего и холодного отверждения. Клеи горячего отверждения

на основе эпоксидных компаундов Д-16, Д-22, Д-23, Д-26, Д-29 имеют температуру отверждения от 100 до 200 °С и могут быть применены для склеивания деталей из латуни, алюминия и его сплавов, стали и др. Компаунды клеи Д-16 и Д-29 отличаются ограниченным сроком использования, а компаунды клеи с отвердителем дициандимидом Д-23 и Д-22 сохраняют свои свойства при комнатной температуре в течение нескольких лет. Был разработан и применяется эпоксидный клей «Эпоксид 1001», поставляемый в твердых кусках, с весьма длительным сроком хранения. Технология склеивания этим клеем состоит в следующем: на нагретую до 150–180 °С деталь прикосновением твердого куска клея наносят тонкую пленку, а затем детали зажимают в приспособлении и производят сушку в течение одного часа при t = 200 °С. Эпоксидный клей широко применяется, например, для крепления полюсных наконечников к магнитам магнитоэлектрических приборов (рис. 85).

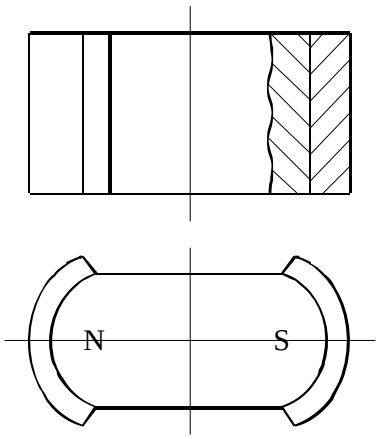


Рис. 85. Конструкция полюсных компонентов
магнитоэлектрического прибора

Резиновый клей, который представляет собой раствор каучука в бензине, применяют для склеивания резины и прорезиненной ткани с деревом и кожей, он небензостоек. Для обеспечения прочности клеевого соединения необходимо точное соблюдение технологии склеивания: толщина слоя клея не должна превышать 0,154–0,25 мм, желательно, чтобы поверхность деталей была шероховатой, необходимо сжатие склеиваемых деталей до тех пор, пока клей не затвердеет. Примеры соединения деталей склеиванием даны на рис. 86.

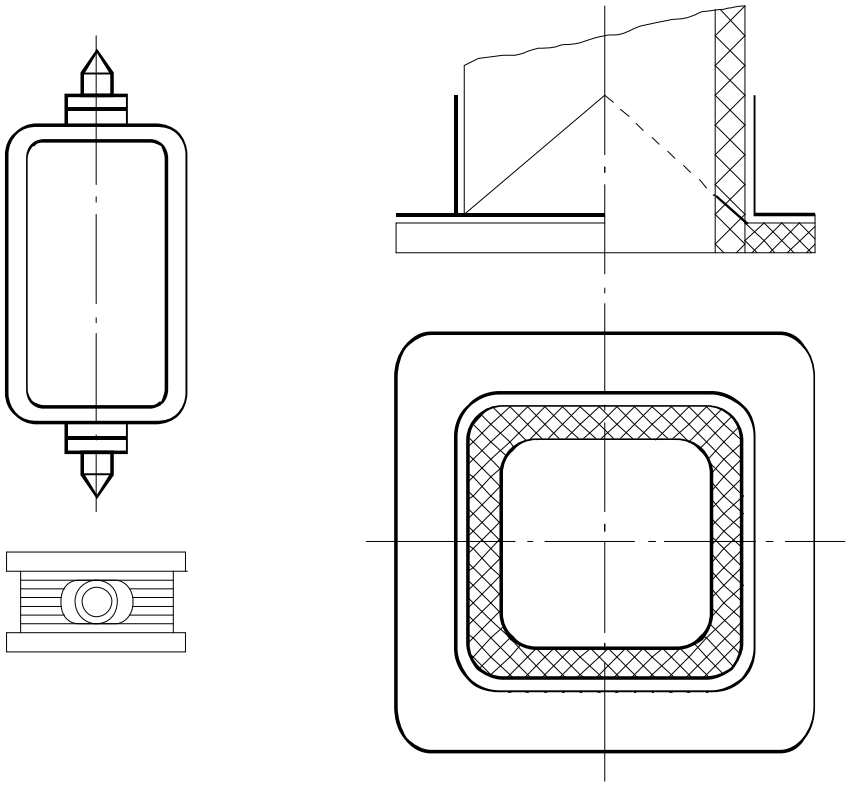


Рис. 86. Процессы соединения склеиванием:
а – приклеивание втулок с кернами к рамке;
б – склеивание каркаса катушки

Прочность приклеивания увеличивается, если склеиваемые вещества имеют разветвленные поры. Проникающий в них клей затвердевает и образует как бы корневую систему, улучшающую условия сцепления. Тонкие пленки клея обеспечивают более прочное соединение, чем толстые слои, так как количество трещин в тонких пленках меньше, а молекулярное сцепление значительно сильнее. Поэтому толщина пленки клея не должна превышать 0,1–0,15 мм. Процесс склеивания состоит из следующих операций:

а) подгонка склеиваемых поверхностей;

б) очистка поверхностей от загрязнений органическими растворителями или механической обработкой;

в) нанесение тонкого ровного слоя склеивающего вещества кистью, поливом или пульверизацией;

г) соединение склеиваемых поверхностей и выдержка их для затвердения клея при заданных температуре и давлении.

Применение клеев с каждым годом расширяется, чему способствуют как увеличение их производства и совершенствование

технологии склеивания, так и создание новых, более сложных приборов, сборка которых без клеев невозможна. Требования, предъявляемые к клеям, весьма разнообразны: это адгезия к самой широкой гамме материалов, в том числе трудносклеиваемых; способность работать под воздействием нагрузок, с одной стороны, и разъемность элементов, с другой; высокие электроизоляционные свойства и электропроводность; возможность получения слоя толщиной в несколько микрометров, так и заполнение зазоров между сопрягаемыми поверхностями величиной до нескольких миллиметров; оптическая прозрачность и непрозрачность клеев и многие другие. В последнее время активно проводятся работы по созданию специальных клеев применительно к требованиям приборостроения, что позволило разработать клеи с принципиально новыми свойствами. В этой связи целесообразно упомянуть клей ВК-26МФ с собственным ферромагнетизмом, обеспечиваемым структурой олигомерных составляющих; электропроводящие клеи, не содержащие драгоценных металлов; термостойкие клеи без растворителя, способные затекать в зазоры величиной в несколько микрометров и др.

Эффективность применения клеев в значительной мере зависит от способа их приготовления и нанесения. Создание специального оборудования (дозаторов) для этих целей имеет важное значение для приборостроения, поскольку обеспечивает применение клеев в условиях конвейерной сборки.

Большое значение в последние годы придается энергоемкости ТП, что нашло отражение при создании нетрадиционных способов отверждения клеев. Применение токов высокой частоты при склеивании магнитопроводов и ультрафиолетовых (УФ) лучей при создании оптических систем обеспечивает резкое сокращение продолжительности отверждения клеевых композиций.

Все перечисленные вопросы, имеющие важное значение для современного приборостроения, нашли отражение.

4.5.2. Применение термостойких клеев

К термостойким клеям, применяемым в приборостроении, предъявляются следующие основные требования: они должны обладать способностью склеивать различные материалы, такие, например, как металлы, керамику, стекло и другие в различных сочетаниях; выдерживать одновременное воздействие вакуума и повы-

шенной температуры; работать в соединениях материалов с различными коэффициентами линейного теплового расширения; не выделять газообразных продуктов в процессе работы при высоких температурах в вакууме.

Однако при создании термостойких клеев трудно удовлетворить все предъявляемые к ним требования, поскольку в некоторых случаях эти требования являются противоречивыми. Например, весьма сложно удовлетворить требования по выбору термостойких клеев для соединения материалов с различными коэффициентами линейного теплового расширения (КЛТР), поскольку термостойкие клеи, как правило, являются жесткими системами, а для компенсации различий в КЛТР от клея требуются хорошие эластические характеристики.

Создание вакуумно-плотных термостойких клеев также сопряжено с большими трудностями, поскольку известно, что все полимерные материалы при повышенных температурах подвержены термодеструкции, которая сопровождается выделением газообразных продуктов и образованием вследствие этого в клеевом шве пор.

Однако, несмотря на все эти трудности, сейчас разработан ряд термостойких клеев (ВК-26М и ВК-38), которые при рабочих температурах до 250 ºС не выделяют конденсационно-способных продуктов и благодаря этому позволяют создавать особо точные приборы. Разработан клей (фенолкаучуковый), обладающий наряду с высокой термостойкостью собственным ферромагнетизмом без введения в состав наполнителя, что позволяет при использовании его для склеивания пакетов магнитопроводов значительно улучшить выходные характеристики приборов, повысив при этом индукцию намагничивания и снизив потери на перемагничивание, а также в ряде случаев заменить дефицитные дорогостоящие магнитомягкие материалы (железокобальтовые сплавы) на дешевую и недефицитную электротехническую сталь с обеспечением необходимых магнитных характеристик (клей ВК-26МФ).

Разработан низковязкий, не содержащий наполнителя клей с теплостойкостью до 300 °С, который благодаря способности проникать в зазоры размером в несколько микрон может быть использован как заливочный компаунд (клей ВК-64). Представляет определенный интерес клей холодного отверждения ВК-58, не содержащий растворителя, имеющий жизнеспособность не менее 5 ч и термостойкость до 500 °С, который обеспечивает получение вакуумно-плотного шва до температуры 200 ºС. Клеи ВКД-1 и ВКД-2

сочетают термостойкость до 400 ºС с высокой эластичностью (удлинение отвержденной пленки не менее 60 %) и могут быть использованы для склеивания материалов с различными коэффициентами линейного теплового расширения.

При изготовлении целого ряда приборов широко используются магнитные элементы, например, магнитопровода, которые изготавливают путем склеивания отдельных пластин из магнитных материалов. Клей в таком соединении выполняет роль изолирующего слоя, препятствующего образованию токов Фуко, которые ухудшают магнитные свойства магнитопровода. В то же время наличие слоя полимерного клея, не являющегося магнитным материалом, ухудшает свойства пакетов, и поэтому слой клея должен иметь минимально возможную величину (толщину) и при этом обеспечивать высокие прочностные характеристики соединения. Для склеивания магнитопроводов используют одноупаковочные низковязкие составы, в течение длительного времени не изменяющие свою вязкость и способные наноситься тонким слоем, не искажающим магнитных свойств пакетов, например, клеи фенолополивинилацетатные БФ-2 и БФР-2К; фенолокаучуковый ВК-26М; элементоорганический, модифицированный каучуком ВК-38.

Из приведенных клеев наименее токсичным является клей ВК-26М, поскольку используемая для его получения фенолоформальдегидная смола содержит небольшое количество свободного фенола (массовая доля составляет 1,5 % вместо 17 % для клеев БФ-2 и БФР-2К). Этот клей обеспечивает также получение клеевых соединений, обладающих наиболее высокими прочностными характеристиками, и позволяет склеивать магнитопроводы из магнитномягких материалов, не ухудшая магнитных характеристик последних, поскольку не требует высокого давления при склеивании.

4.5.3. Быстросхватывающиеся клеи для сборки изделий на печатных платах

Сейчас для крепления микросхем и проводов на ПП, шасси приборов и т.д. взамен токсичной и коррозионно-активной мастики ЛН преимущественно применяются клеи марки ВК-9, мастика У-9М, цианакрилатный клей КМ-203, клеи ГИПК-23-16 и ГИПК-23-12. Все указанные композиции за исключением клея КМ-203 многокомпозиционны, нередко требуют длительного времени отвержде-

ния, большинство содержит в своем составе растворители, что затрудняет их использование в автоматизированных производственных процессах. Клей КМ-203 характеризуется высокой скоростью отверждения, однако клеевые соединения на его основе обладают недостаточными ремонтопригодностью и влагостойкостью. Наряду с этим в последние годы для склеивания различных материалов находят применение термопластичные клеи (клеи-расплавы) и клеи УФ-отверждения, что обусловлено такими их преимуществами, как высокая скорость образования клеевых соединений («быстросхватывающиеся» клеи), отсутствие растворителя в составе композиции, ремонтопригодность. Клеи-расплавы, применяющиеся в радиоэлектронике за рубежом, в качестве связующих содержат в основном полиамиды, а также полиэфиры и сополиэфирамиды. К ним относятся полиамидные клеи марки Versalon фирмы General Mills)США); полиамидные и полиэфирные клеи Macromelt фирмы Henkel (ФРГ) и Eurelon фирмы Schering Industrie Chemikalism (ФРГ); адгезивы Hotmelt М-930 и М-975 фирмы Mitsui (Япония); клеи-расплавы на основе сополиэфиров фирмы Atochimite (Франция). Большой интерес представляют клеи на полиамидной основе, обладающие низкой вязкостью расплава, быстрым схватыванием, возможностью склеивания без применения давления, высокой адгезией к различным материалам. В качестве полиамидной составляющей они обычно содержат продукты, получаемые конденсацией димеризованных ненасыщенных жирных кислот растительных масел с диаминами.

Разработан клей-расплав марки ТК-15 на основе модифицированного полиамида, не содержащего сырья растительного происхождения.

Клей ТК-15 предназначен для быстрого крепления на ПП проводов, жгутов и изделий электронной техники при сборочно-монтажных работах. Нанесение расплава клея, нагретого до температуры 190–210 °С, производится с помощью термопистолета, в который вставляются прутки клея.

Клей-расплав можно наносить в виде отдельных капель, линий или полос, для чего используют наконечники требуемой конфигурации. Склеивание происходит вследствие затвердевания расплава при охлаждении. Клеевой шов ремонтопригоден с помощью, например, повторного расплавления паяльником и т.п.

Клеевые соединения на ПП, выполненные клеем ТК-15, выдерживают не менее 20 циклов изменения температуры в диапазоне

от –60 до +120 °С, синусоидальную вибрацию частотой от 5 до 2500 Гц при ускорении 15, а также действие ударных нагрузок. Клей-расплав ТК-15 совместим с лаками ЭП-730 и УР-231, не оказывает разрушающего воздействия на изоляцию проводов марок МШДЛ, МГШВ, МГТФ и др. К реакционноспособным композициям относится фоточувствительный эпоксиакриловый клей КУФО, способный быстро схватываться под воздействием УФ-облучения и, если надо, доотверждаться при нагревании с образованием нерастворимых и неплавких продуктов полимеризации.

Для крепления элементов электронной техники на ПП известно применение зарубежных УФ-отверждаемых клеев марок UV-300 (Япония), UVS-l0 (Япония), RO-38/6T (ФРГ). Зарубежные клеи, как правило, однокомпонентны, имеют срок годности 2–3 месяца.

Наиболее оптимальным сочетанием технологических свойств обладают фоточувствительные клеи, способные, как указано выше, к комбинированному отверждению. К ним относятся клеи марок ИВА-301 (Япония), UVS-50R (Япония). Данные клеи являются ремонтопригодными после стадии УФ-отверждения, а после термообработки при 150 °С способны выдерживать условия пайки и другие технологические воздействия в процессе выполнения сборочно-монтажных работ. Клей КУФО двухкомпонентен. Жизнеспособность клея с введением отвердителя (фотоинициатора) не менее 8 ч. Отдельно компоненты могут храниться не менее четырех месяцев. Клей КУФО наносится на ПП с помощью автоматических дозаторов, например, дозатора типа 1000Д фирмы Electron Fusion Devises Inc. (США) или установки для нанесения жидких, полимерных композиций.

Дозируемое количество должно быть достаточным для образования по краям прикрепляемого элемента небольшого выступа клея, который легко может контролироваться, так как клей окрашен в розовый цвет. УФ-отверждение производится в течение 30 с на конвейерных установках типа «Фотон-1» (НПО «Спектр» Москва) или МУФС-901М, снабженных двумя лампами излучения УФ 200–400 нм общей мощностью не менее 10 кВт. После УФ-отверждения клеевой шов выдерживает воздействие технологических операций при сборке: при этом приклейка является ремонтопригодной (элемент может быть заменен). Окончательное отверждение происходит в ИК-сушилках в течение нескольких минут или при конвекционном нагревании при температуре 60–58 °С в течение 4 ч. Крепления элементов на ПП, выполненные клеем КУФО, выдерживают условия механизированной пайки: температура 250±10 °С,

воздействие вибрации, ударных нагрузок и обезжиривающих жидкостей. По сравнению с клеем марки RO-38/6T клей КУФО содержит летучих веществ в два раза меньше, а клеевой шов имеет более высокую термоударостойкость.

4.5.4. Клеи в тензометрии

Тензорезисторы применяют для изучения воздействия статических и динамических деформаций конструкций в диапазоне температур от –196 до +300 °С.

Для тензометрирования применяют клеи холодного отверждения Циакрин-ЭО, ВК-9 и ПИР-2. Максимальные рабочие температуры ТР составляют 80, 200 и 300 °С соответственно, однако клей ПИР-2 имеет ограниченное использование вследствие его дефицитности.

Применяют также клей ВК-54М, который обладает хорошими свойствами по передаче деформаций от наследуемой поверхности к ТР при циклических нагрузках до температур выше 300 °С.

Клей ЦВК-54М способен отверждаться при комнатной температуре. При приклеивании ТР клеевые соединения дополнительно термообрабатывают при 70–100 °С. К недостаткам можно отнести малую жизнеспособность (20–30 мин). Кроме того, клей обеспечивает необходимый уровень показаний ТР только после первых двух нагревов до 200 °С.

Недавно разработан клей холодного отверждения ВК-58, который предназначается для эксплуатации в малонагруженных узлах изделий при температурах выше 300 °С для склеивания металлов (углеродистых и нержавеющих сталей, титановых сплавов) между собой и с теплостойкими неметаллическими материалами на основе кремнийорганических связующих.

Клей ВК-58М является модификацией клея ВК-58, обладает более высокими прочностными характеристиками клеевых соединений при повышенных температурах. Технологические свойства клея ВК-58М аналогичны свойствам клея ВК-58. Клеи ВК-58 и ВК-58М могут быть рекомендованы для приклеивания ТР марки ЕТ-86 для работы в диапазоне от –196 до +300 °С, так как полностью отвечают требованиям, предъявляемым к клеям для тензометрии: являются технологичными, дают возможность получения тонкого клеевого шва, обеспечивают надежное крепление ТР к иссле-

дуемой поверхности во всем диапазоне рабочих температур, осуществляя точную передачу деформации при первом нагружении.

4.5.5. Клеи для магнитопроводов

В настоящее время склеивание пластин при изготовлении пакетов магнитопроводов производится путем предварительного несения клея на каждую сторону отдельной пластины, удаления из слоя клея растворителя, последующей сборки пластин в пакет, запрессовки пакета и термообработки для отверждения клея. Но имеются недостатки:

1) необходимость нанесения двух слоев клея на каждую сторону пластины и открытая выдержка после нанесения каждого слоя удлиняют ТП изготовления пакетов и увеличивают его трудоемкость;

2) сборка пластин с нанесенным клеем в пакет приводит к их относительному смещению, что в свою очередь влечет за собой механическую обработку пакетов после склеивания для получения точного контура, что приводит к первоначальному увеличению размеров пакета, а следовательно, к металлоемкости;

3) выдавливание потеков клея на поверхность пакета делает необходимой механическую зачистку его пазов, что ухудшает магнитные свойства на 20 %.

Значительно более конструктивным является склеивание пакетов магнитопроводов капиллярным способом, когда пластины набираются в пакет на специальную оправку и сжимаются по торцам тарированной пружиной с усилием 0,1–0,3 МПа (средняя величина зазора при этом составляет 1–3 мкм); после чего к боковой поверхности пакета подводится клей, и благодаря капиллярным свойствам (силам) клеющий состав приникает в зазоры между пластинами, смачивает их боковые поверхности (для ускорения процесса проникновения клея оправка с пакетом может предварительно нагреваться до 80±10 °С). Термообработка осуществляется в соответствии с режимом отверждения клея.

Применение капиллярного способа склеивания пакетов позволяет снизить трудоемкость их изготовления, получить более точный контур и, следовательно, уменьшить припуск размеров пластин под механическую обработку, снизить толщину клея и за счет этого улучшить магнитные свойства пакета.

К клеям, предназначенным для склеивания пакетов магнитопроводов капиллярным способом, предъявляется ряд специфических требований: клей должен обладать одновременно клеющими и пропиточными (капиллярными) свойствами, вязкость клеющего состава должна обеспечивать его проникновение в зазоры между соседними пластинами (не более 1 мкм) на расстояние не менее 15 мм. Клей не должен содержать растворителей и обеспечивать прочность соединений при сдвиге не менее 16 МПа.

Всем вышеуказанным требованиям отвечает однокомпонентный клей (теплостойкий, зазорозаполняющий) – ВК-64.

Клей ВК-64 представляет собой однородную массу от темно-желтого до светло-коричневого цвета. Динамическая вязкость клея при 25 °С не более 3,5 Па·с. Жизнеспособность при хранении в герметической таре при 15–30 °С – не менее трех месяцев.

Клей ВК-64 рекомендуется для склеивания элементов конструкций из алюминиевых и титановых сплавов, коррозионно-стойких и электротехнических сталей, а также для склеивания магнитопроводов систем автоматики и электромеханики капиллярным способом. Клей ВК-64 рекомендуется для эксплуатации в диапазоне от –60 до +300 °С. Клей ВК-64 наносят на поверхности, подлежащие склеиванию в один слой шпателем, кистью, окунанием, краскораспылителем. При нанесении клея на пластины магнитопровода капиллярным способом давление на склеивание пластины в оправке должно быть не более 0,05 МПа. Клей наносят с торца тонким слоем на поверхность, нагретую до 70–80 °С. Склеивание проводят при температуре 200±5 °С и давлении 0,03–0,05 МПа в течение 3 ч. Для увеличения термостойкости клеевых соединений допускается дополнительная термообработка без давления при 250 °С в течение 2 ч. По окончании режима склеивания детали следует охладить, не снимая давления, до 50–70 °С и распрессовать.

Клей ВК-64 обладает хорошей адгезией к различным материалам. Прочность при сдвиге клеевых соединений стали 12Х18Н9Т и пермолоев 50 Н составляет 11–12 МПа. Клей грибостоек, коррозионно-устойчив: контакт с клеем не вызывает коррозии различных металлов и электротехнических сталей.

4.6. Монтаж тканными устройствами коммутации

Использование ткани, вырабатываемой из электропроводящих и диэлектрических нитей, является новым направлением выполнения электромонтажа. В общем виде тканые устройства коммутации

(ТУК) представлены на рис. 87 и состоят из сплошного одно- или многослойного изоляционного поля. С двух сторон поля во взаимно перпендикулярных направлениях по координатам X и Y проложены электропроводящие нити 3 и 4, которые на наружных поверхностях в заданных точках образуют контактные узлы 6, обеспечивающие электрическое соединение между отдельными электропроводящими нитями. На наружных поверхностях также формируются контактные площадки 2, петли разной формы 5, удлиненные выводы 7 и другие контактные элементы, необходимые для соединения платы со схемными элементами и штепсельными соединителями. Для получения ТУК используются электропроводящие нити из меди маржи ММ или провода в полиамидной изоляции марки ПЭВТЛК и диэлектрические нити из полиэтилена, стеклоткани или капрона диаметром 0,10–2,5 мм. Изготавливают такие устройства на высокопроизводительных ткацких автоматах, которые дополнительно снабжены механическими петлеобразователями, устройствами подачи и натяжения нитей. Сформированные структуры поступают на дальнейшую обработку, выбор которой определяется условиями эксплуатации.

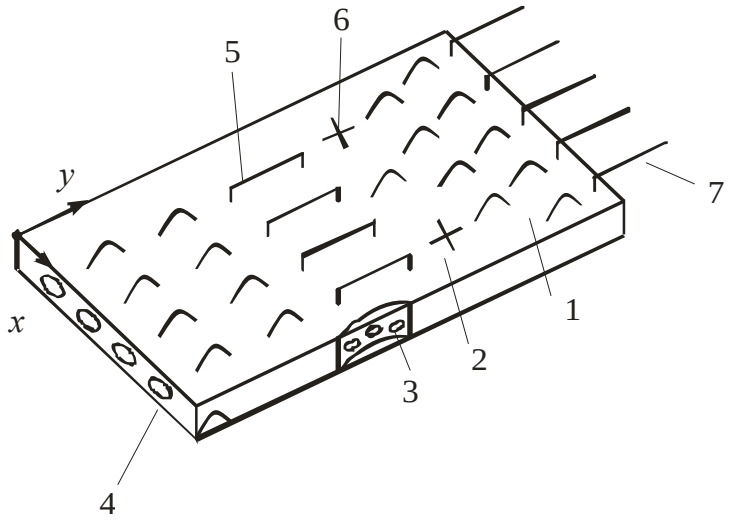


Рис. 87. Структура тканых устройств коммутации

Термофиксирование представляет собой тепловую обработку при температуре 180–220 °С путем продувки нагретого воздуха или пара с целью фиксации термопластичных нитей и переплетений.

Оплавление обеспечивает более надежное изолирование электропроводящих нитей, кромок структур, контактных площадок и

проводится при температуре выше температуры плавления диэлектрического материала.

Повышение механической прочности и жесткости ТУК достигается их пластифицированием, которое представляет собой процесс заливки сеточной структуры пластическими массами. Компаундирование тканых элементов составами на основе растворов кремнийорганических каучуков обеспечивает гибкость, повышенную химическую стойкость и стойкость к климатических воздействиям в жестких условиях эксплуатации.

Формование представляет собой термическую обработку ткани с целью придания ей пространственной формы и ее стабилизации.

Соединение электропроводников в контактных узлах осуществляется через элементарные ячейки сетки контактной или диффузионной сваркой с последующей герметизацией зоны сварки. Функционально ТУК подразделяются на четыре группы: конструктивы, платы, кабели и соединители (рис. 88). Каждая структура может быть одно- или многослойной с двухкоординатным, внутримодульным, внутриблочным или межблочным расположением нитей. Токоведущие провода могут быть одинакового или различного сечений, с равным или различным шагом и определенным числом нитей (одна, две, три). У одного края тканых кабелей располагают одну или несколько цветных кодовых нитей. Особенности технологии позволяют получать как гибкие и эластичные, так и жесткие коммутационные устройства плоской или объемной (фасонной) формы.

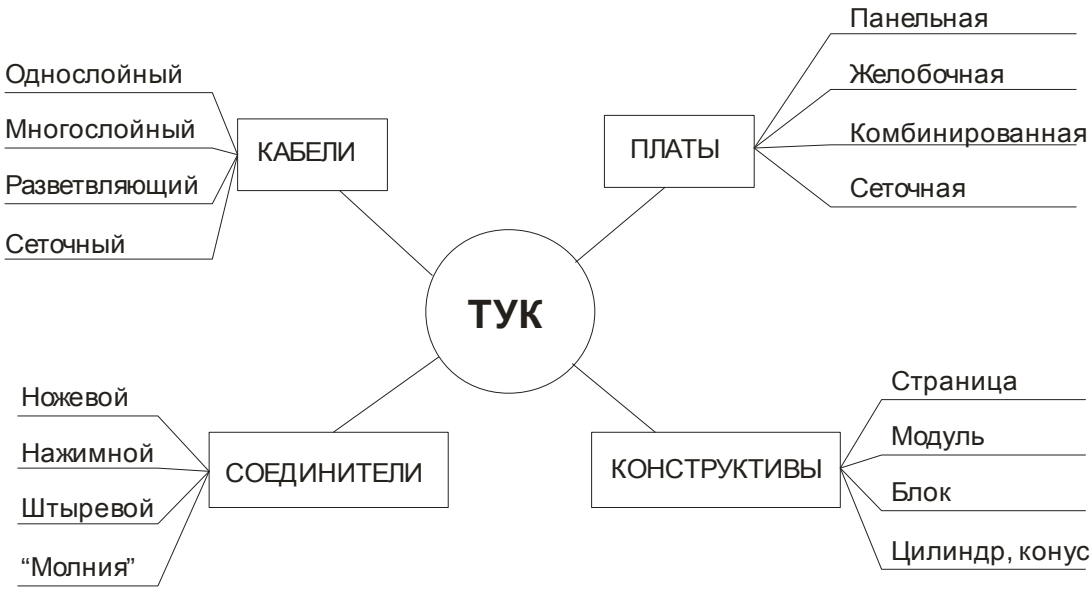


Рис. 88. Виды конструктивов на основе тканых устройств коммутации

Тканые устройства коммутации обеспечивают следующие технические характеристики соединений:

- эклектрическое сопротивление электропроводящих нитей – не более 0,1 Ом;
- прочность изоляции выдерживает испытательное напряжение 1000 В;
- электрическое сопротивление изоляции после пребывания в камере 10 суток с относительной влажностью 98 % при температуре 40 °С составляет 10–12 МОм;
- диапазон рабочих температур от –50 до +65 °С;
- электрическая емкость между электропроводящими нитями 33–38 пФ.

С экономической точки зрения вследствие высокой производительности текстильных станков изготовление ТУК в 5–6 раз дешевле, чем изготовление аналогичных по структуре ПП или плат с проводным монтажом. Одновременно достигается экономия цветных и драгоценных металлов и их реактивов, снижение затрат на инструмент. Монтаж ТУК находит применение при изготовлении связной электронной аппаратуры, а также в тех устройствах, где требуется изменение формы структур после выполнения монтажно-сборочных работ. К недостаткам ТУК относятся:

- невыявленность контактных структур над поверхностью ткани;
- необходимость химической обработки для этих целей;
- низкая точность;
- недостаточная ремонтопригодность.

Несмотря на это, конструктивы на основе тканых устройств коммутации находят широкое применение.

4.7. Стежковый монтаж радиоэлектронных средств

Стежковый монтаж представляет собой процесс трассировки электрических цепей по кратчайшим расстояниям на поверхности двусторонней печатной платы (ДПП), имеющей контактные площадки и монтажные отверстия, с помощью изолированных прово-

дов, которые образуют в монтажных отверстиях петли, подпаиваемые к контактным площадкам. Технологический процесс состоит из следующих операций: получение монтажной ДПП, прокладка трасс и прошивка монтажными проводами платы по заданным адресам, лужение петель, распайка их на контактные площадки, контроль правильности выполнения соединений.

Монтажная плата изготавливается по типовой технологии, ее основными элементами являются контактные площадки для подсоединения планарных выводов ИС, ЭРЭ, соединителей, шины питания, монтажные отверстия по петле и контактные площадки для распайки петель. В качестве диэлектрического основания применяют стеклотекстолит с толстым медным слоем (СФ-2Н-56), что позволяет улучшить теплоотвод и исключить отслаивание контактных площадок при пайке на них петель. Монтаж ведут изолированными проводами (ПЭВТЛК) 0,08–0,2 мм. Рисунок ПП покрывается через сетчатый трафарет технологическим покрытием, улучшающим паяемость. Отверстия под петли располагаются с одной стороны и симметрично относительно контактных площадок. Размеры отверстий на 0,2–0,3 мм превышают размеры инструмента, используемого для монтажа. Изготавливаемая монтажная плата 1 (рис. 89) собирается по базовым штырям в специальном приспособлении в пакет, который состоит из слоев кабельной бумаги 2, нескольких слоев эластичной резины 3 толщиной 0,5 мм и листа плотной резины 4. Трассировка и прошивка платы осуществляются пустотелой иглой при ее возвратно-поступательном движении. Игла имеет диаметр на 0,08–0,l мм, превышающий диаметр монтажного провода, и односторонний скос с углом заточки 50–75°, ее изготавливают из нержавеющей стали длиной 25–35 мм. Игла с расположенным внутри монтажным проводом, проходя через монтажное отверстие 5, прокалывает слои эластичной резины, которые задерживают провод при обратном ходе иглы. Для укладки провода используются ручные прошивочные карандаши или станки с ЧПУ. После окончания прошивки со стороны проводов на плату накладывается и закрепляется металлическая пластина с губчатой резиной для поджатия проводов. С монтажного приспособления последовательно снимаются слои твердой и эластичной резины, оставшийся слой кабельной бумаги защищает плату при лужении и удаляется после выполнения операции.

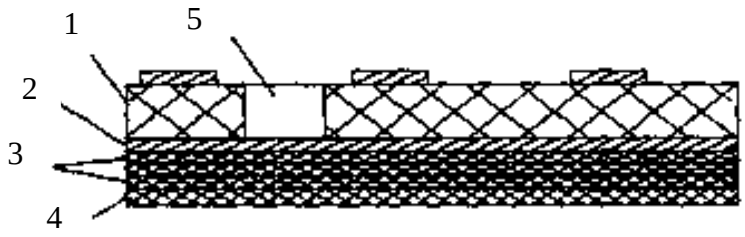


Рис. 89. Сборка платы для стежкового монтажа

Предварительное лужение петель обеспечивает высокое качество соединений при последующей пайке. Его осуществляют вручную паяльником с трубчатой насадкой, нагретой до температуры 320–340 °С, или групповым способом. Механизированное лужение проводят погружением в ванну припоя после обработки плат флюсом ФКСп или ФКТ. Возможно бесфлюсовое лужение петель при температуре 350±10 °С с выдержкой в течение 5–6 с. Подгибка и пайка петель на контактные площадки осуществляются также вручную паяльником или на станке с ЧПУ, который имеет унифицированную базу для позиционирования платы с высокой точностью и оригинальный механизм технологической головки (рис. 90).

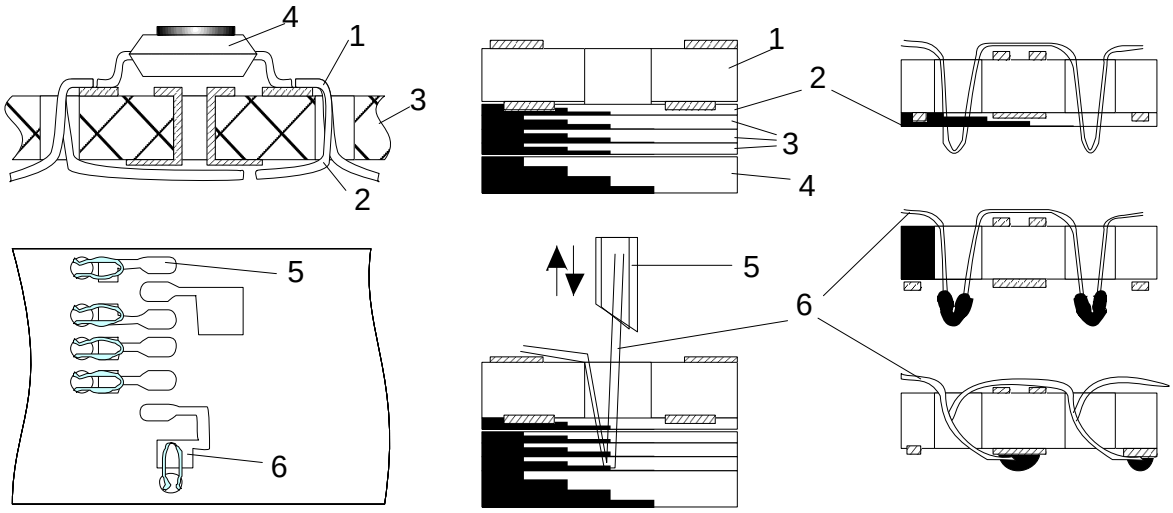


Рис. 90. Стежковый монтаж:

а – основные элементы платы: 1 – монтажный провод; 2 – петля провода; 3 – основание платы; 4 – навесной элемент; 5 – контактные площадки для монтажа вывода ИМС; 6 – контактные плащадки для подпайки петель

б – схема технического процесса: 1 – печатная плата; 2 – слой кабельной бумаги; 3 – слой резины толщиной 0,5 мм; 4 – толстая резиновая прокладка; 5 – игла; 6 – петли провода

Несмотря на то, что отдельные операции стежкового монтажа автоматизированы, производительность и эффективность всего процесса невелики из-за того, что каждая операция требует продолжительного ручного труда по сборке и разборке различных приспособлений. Дальнейшее развитие технологического оборудования идет по пути создания специализированного оборудования, на котором будет выполняться весь комплекс работ или их основная часть. Технология стежкового монтажа совершенствуется в направлении использования для контактирования петель с платой операций сварки и приклеивания токопроводящими композициями, отработки режимов присоединения монтажных проводов непосредственно к выводам ИС, что значительно упростит процесс и повысит надежность соединений.

Глава 5

Методы обеспечения точности радиоэлектронных средств

5.1. Расчет размерных цепей

Технологический процесс механического соединения отдельных деталей в сборочный элемент или сборочных элементов в сложное изделие, обеспечивающий заданное их расположение и взаимодействие, называют сборкой.

Технологический процесс электрического соединения отдельных элементов (деталей) изделия в соответствии с электрической принципиальной схемой называют «электрическим монтажом» или просто «монтажом».

Сборка изделий является ответственным этапом производственного процесса, где проявляются недостатки предшествующих этапов изготовления отдельных деталей, а также соответствие их конструкции требованиям надежности. Доля сборочных работ в общем производстве РЭС достаточно велика. Технология сборки отличается большим разнообразием в зависимости от последовательности выполнения сборочных соединений, способов их осуществления, применяемого оборудования и технологического оснащения. К основным условиям, определяющим технологию сборки, можно отнести тип производства и конструктивно-технологическую характеристику изделия, технические требования и условия эксплуатации.

Существуют два вида сборки:

а) обусловленная, т.е. сборка, к которой предъявляются специальные требования по точности выполнения сопряжения и закрепления собираемых деталей;

б) необусловленная, т.е. сборка, к точности выполнения сопряжения собираемых деталей которой не предъявляют каких-либо повышенных требований.

Обусловленная сборка осуществляется следующими методами:

- методом полной взаимозаменяемости (МПВ) (массовое производство);

- методом неполной взаимозаменяемости (МНВ) (крупносерийное и серийное производство);
- методом групповой взаимозаменяемости (МГВ) (селективная сборка в массовое и крупносерийное производство повышенной точности);
- методом пригонки (МП) (серийное и единичное);
- методом регулировки (МР) (серийное и единичное производство).

Выбору метода предшествует работа по определению выражения, связывающего производственные погрешности выходных параметров с погрешностями параметров составляющих деталей.

Метод полной взаимозаменяемости

Сущность метода заключается в том, что требуемая точность выходных параметров функциональных узлов достигается включением в схему узла деталей с определенными (узкими) допусками на их параметры без каких-либо дополнительных операций подбора или подгонки.

К числу наиболее распространенных методов сборки относятся методы полной взаимозаменяемости и селективной сборки.

Метод полной взаимозаменяемости, предусматривающий выбор допусков на погрешности изготовления отдельных радиокомпонентов, определяемых относительными погрешностями E и коэффициентами влияния A настолько малыми, чтобы выполнилось условие

$$E = \sum_{i=1}^{n} A_i E_i = E_{\text{зад}} \qquad (42)$$

непревышения относительной погрешности, определяемой прежде всего условиями нормального функционирования устройства заданного предельного значения $E_{\text{зад}}$.

Выбор величин допусков на отдельные параметры устройства производится на основе анализа прежде всего уравнения технологической точности и во многом определяется выбором метода сборки. Метод сборки зависит от конкретных условий завода-изготовителя и во многом от условий эксплуатации объекта производства.

Очевидно, что для выполнения этого неравенства допуски на параметры элементов должны быть такими, чтобы в сумме они не превышали заданного допуска.

Как правило, при решении прямой задачи теории точности количество уравнений допусков бывает меньше числа неизвестных членов уравнений. При этом задача является неопределенной, и необходимые допуски на выходной параметр могут быть получены различными сочетаниями первичных допусков – методом последовательных приближений.

Тем не менее наличие системы уравнений допусков, а также возможности выбора допусков на различные параметры схемных элементов упрощают задачу расчета допусков.

Допуски на параметры деталей рассчитываются путем решения системы уравнений, в которой известными величинами являются производственные допуски на выходные параметры:

$$\delta\left(\frac{\Delta\Pi_1}{\Pi_1}\right)_{\text{задан}} \geq \sqrt{\sum_{i=1}^{n} B_i^2 k_i^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)}$$

. . . .

$$\delta\left(\frac{\Delta\Pi_{in}}{\Pi_{in}}\right)_{\text{задан}} \geq \sqrt{\sum_{i=1}^{n} B_i^2 k_i^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)}$$

Практическим критерием обеспечения полной взаимозаменяемости принято считать такое соотношение между кривой распределения погрешностей выходного параметра изделия и полем допуска на него, при котором в пределах поля допуска содержится 99,73 % всех отклонений параметра и лишь 0,27 % отклонений могут выходить за пределы поля допуска.

Метод полной взаимозаменяемости имеет следующие достоинства:

1) просто достигается требуемая тонкость выходных параметров функциональных узлов, так как комплектация функциональных узлов деталями и сборка их просты;

2) нет необходимости в регулировке, что упрощает ТП, облегчает его нормирование и перевод на поточные методы производства;

3) легко заменяются вышедшие из строя узлы без дополнительной регулировки;

4) широко кооперируются заводы при изготовлении взаимозаменяемых элементов.

Границы применимости метода полной взаимозаменяемости определяются экономикой производства. Так как себестоимость изготовления схемных элементов гиперболически зависит от величи-

ны допусков на их параметры, по мере повышения точности приходится изменять ТП и вводить дорогостоящее оборудование (рис. 91).

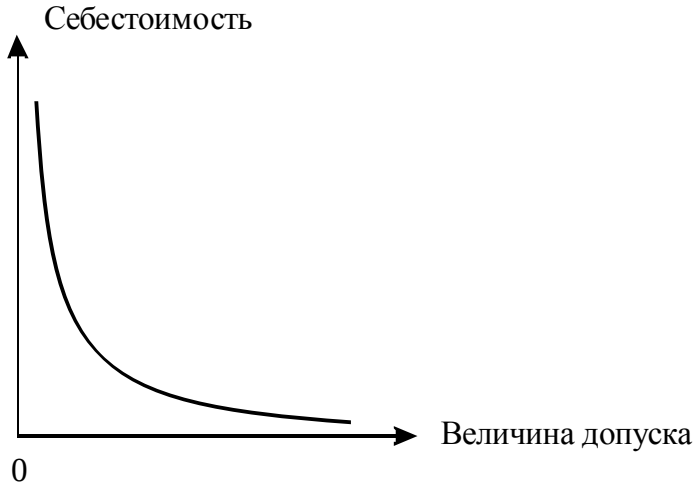


Рис. 91. График зависимости себестоимости детали от допуска на ее параметр

При методе взаимозаменяемости любая сборочная единица (деталь, элемент), выполненная в пределах допуска, входит в сборочный комплект. Случай двух параметров X_1 и X_2, образующих сборочный комплект Y, представлен на рис. 92. Таким образом, осуществляется так называемая сплошная сборка, при которой годные детали полностью взаимозаменяемы. Сборка, основанная на взаимозаменяемости, обеспечивает наиболее простую технологию сборочного процесса по сравнению с другими методами.

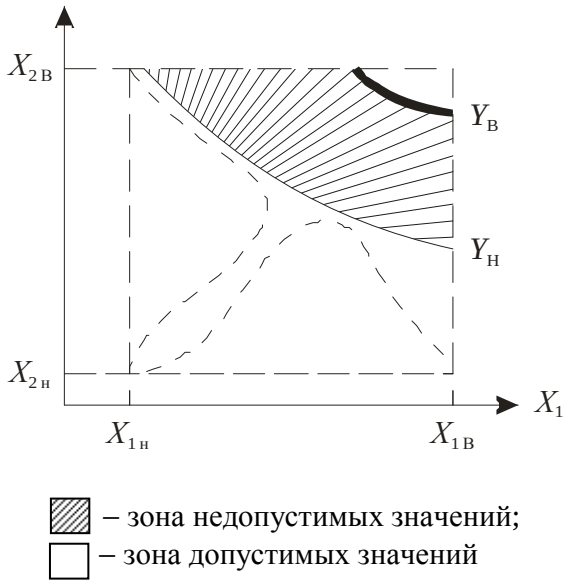


Рис. 92. Пример комплектования деталей по методу полной взаимозаменяемости

Метод неполной взаимозаменяемости

Сущность этого метода заключается в том, что требуемая точность выходных параметров сборочных единиц достигается путем установки более широких допусков на параметры комплектующих ЭРЭ. В результате этого получается некоторое количество изделий, у которых погрешности выходных параметров вышли за пределы заданного допуска. Так как процент брака невелик, то дополнительные затраты труда и средств на исправление брака меньше, чем затраты на изготовление ЭРЭ с более жесткими допусками на их параметры. Пояснить изложенное можно графиками (рис. 93).

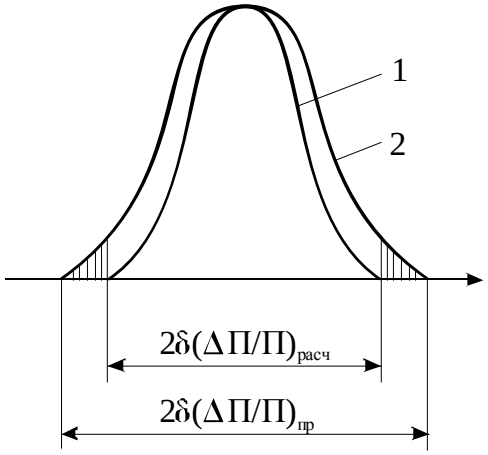


Рис. 93. Расширение поля допуска
по методу неполной взаимозаменяемости

В случае применения МНВ расчет допусков на выходные параметры проводится по формуле

$$\delta\left(\frac{\Delta\Pi_i}{\Pi_i}\right)_{\text{задан}} \geq \frac{1}{K_\Sigma}\sqrt{\sum_{i=1}^{n} B_i^2 k_i^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)}\,, \qquad (43)$$

где K_Σ – коэффициент относительного рассеяния выходных параметров, который выбирается в зависимости от допустимого процента брака изделий:

Брак, %	0,27	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0
K_Σ	1	1,05	1,11	1,17	1,21	1,26	1,3	1,33	1,36	1,4	1,44

В отличие от МПВ этот метод использует более широкие допуски на параметры элементов. При этом есть определенный риск получить некоторое количество функциональных узлов, у которых погрешности выходных параметров выходят за пределы заданного допуска.

В основе метода лежит известное положение о том, что все возможные сочетания параметров элементов встречаются значительно реже, чем сочетания их средних значений. Поэтому процент брака невелик.

Причем дополнительные затраты на исправление бракованных функциональных узлов меньше, чем затраты на изготовление элементов с более жесткими допусками.

Метод неполной взаимозаменяемости допускает некоторое небольшое значение погрешности на определенном этапе производства, что заведомо влечет потери производства, оправданные в конечном счете резким снижением себестоимости компонентов.

Основным преимуществом МНВ по сравнению с МПВ является использование более широких экономически выгодных допусков на параметры ЭРЭ, что особенно важно при жестких допусках на производственные погрешности выходных параметров сборочных единиц.

Метод групповой взаимозаменяемости (селективная сборка)

Сущность метода групповой взаимозаменяемости (МГВ) заключается в том, что требуемая точность выходных параметров функциональных узлов достигается включением в схему одного или нескольких элементов с узкими допусками на их параметры, и с этой целью производится предварительная селекция схемных элементов. Метод групповой взаимозаменяемости включает этап предварительной сортировки радиокомпонентов (которые выполнены с заведомо большим разбросом параметров, чем это допускается) на отдельные группы с узким полем допуска, таким, что далее обеспечиваются условия сборки по методу полной взаимозаменяемости.

Расчет допусков на производственные погрешности параметров схемных элементов проводится в два этапа. Вначале определя-

ются допуски на параметры элементов, но при этом полагают, что погрешности сильновлияющих элементов $\delta\left(\frac{\Delta q_1}{q_1}\right)$ и $\delta\left(\frac{\Delta q_2}{q_2}\right)$ равны нулю. В этом случае допуск на выходной параметр $\delta''\left(\frac{\Delta \Pi_i}{\Pi_i}\right)$ будет меньше заданного даже при широких, экономически оправданных допусках на параметры рассчитываемых ЭРЭ:

$$\delta''\left(\frac{\Delta \Pi_i}{\Pi_i}\right)_{\text{задан}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-2} B_i^2 k_i^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)}.$$

На втором этапе определяют допуски на параметры сильновлияющих элементов из равенства

$$\delta\left(\frac{\Delta \Pi_i}{\Pi_i}\right)_{\text{задан}} - \delta\left(\frac{\Delta \Pi_i}{\Pi_i}\right) \geq \sqrt{B_1^2 k_1^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_1}{q_1}\right) + B_2^2 k_2^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_2}{q_2}\right)}$$

методом последовательного подбора.

Преимуществом МГВ по сравнению с МПВ является возможность получения повышенной точности выходных параметров сборочных единиц.

При применении МГВ следует помнить, что увеличение числа селектируемых элементов и установление очень узких допусков на них могут привести к значительному снижению экономичности метода.

Метод групповой взаимозаменяемости, включающий в себя этап предварительной сортировки радиокомпонентов, которые выполнены с заведомо большим разбросом параметров, чем это допускается, на отдельные группы с узким полем допуска, обеспечивающим выполнение приведенного выше условия.

Основное преимущество метода – выбор более широких допусков на комплектующие, особенно при жестких требованиях к точности выходных параметров.

При селективной сборке по определенному правилу составляют комплект из сборочных единиц, например, деталей узла,

предварительно рассортированных на группы выходного параметра (рис. 94).

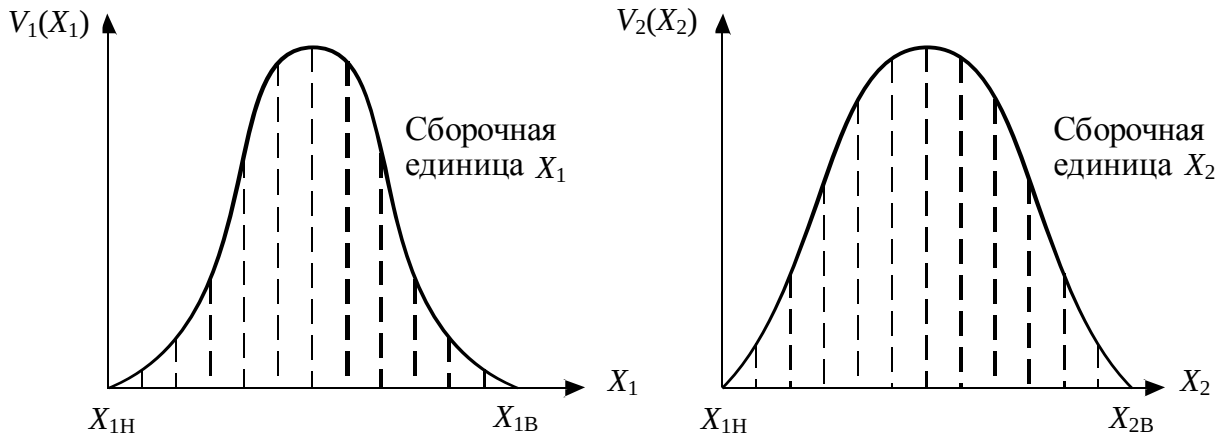


Рис. 94. Пример разбиения на группы при селективной сборке двух сборочных единиц

Неотъемлемыми частями ТП селективной сборки являются сортировка деталей на группы в пределах, установленных расчетом групповых отклонений, и комплектование набора сборочных единиц, входящих в те или иные группы согласно алгоритму комплектования. Сортировка и комплектование усложняют процесс сборки, но селективная сборка дает в целом выигрыш по точности обеспечения выходного параметра. Пример разбиения на группы с определенными допусками для случая двух параметров X_1 и X_2 приведен на рис. 95.

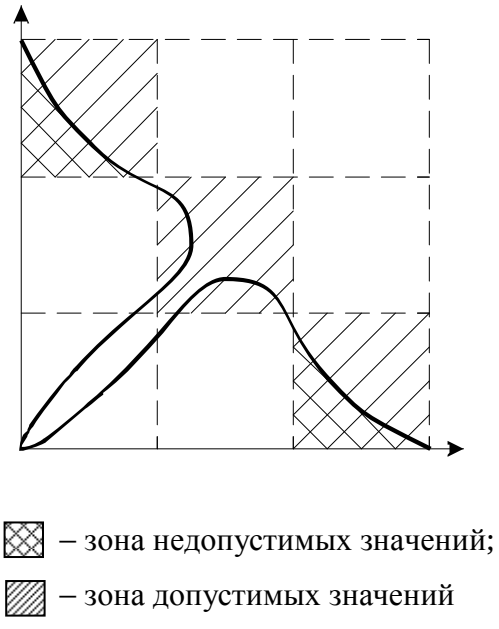


Рис. 95. Пример комплектования деталей при селективной сборке

Возможны два аспекта применения селективной сборки.

Первый – в случае, когда точность выходного параметра Y настолько высока, что выдержать необходимые допуски на параметры ΔX_i (сборочных единиц при сплошной сборке по методу взаимозаменяемости) практически невозможно из-за ограниченной точности изготовления сборочных единиц с параметрами X_i.

Второй состоит в том, что расширение допусков до экономически целесообразных позволяет значительно снизить затраты на изготовление отдельных сборочных единиц. При этом выгоды от снижения затрат значительно превосходят те дополнительные расходы, которые вызываются усложнением селективной сборки, т.е. введением дополнительных операций.

Таким образом, селективную сборку применяют в основном при высокой точности выходного параметра РЭС.

Применение селективной сборки ограничивается некоторыми дополнительными условиями. Если в процессе эксплуатации параметры сборочных единиц изменяются во времени (например, за счет уходов) неодинаково, то связь между параметрами сборочных единиц X_i и выходными параметрами Y оказывается нарушенной и параметр Y может выйти за пределы допуска X_i.

Также нежелательно применение селективной сборки и в том случае, если при ремонте РЭС заменяется одна из сборочных единиц, входящая в сборку РЭС. Последнее требует при ремонте наличия запасных компонентов по всем селективным группам.

Одним из существенных недостатков селективной сборки является необходимость сортировки сборочных узлов и наличие незавершенного производства, которое формируется за счет:

1) несовпадения законов распределения одного и другого параметра в соответствующих друг другу группах, при этом доля «несобираемых изделий» определяется разностью вероятностей попадания изделий в группы;

2) конечного, ограниченного размером выборки и вследствие этого случайного характера эмпирической частоты появления события (заданного размера изделия) в выборке.

Фактором, сдерживающим применение селективной сборки, является наличие некоррелированных в группах уходов параметров во времени, что делает необходимым назначение весьма жестких коэффициентов и допустимых уровней ограничения, а также при ремонте надо иметь широкий набор элементов из всех групп.

Сущность метода заключается в том, что требуемая точность выходных параметров достигается путем включения в конструкцию сборочных единиц одного или нескольких схемных элементов с узкими допусками на их параметры, полученными в результате селекции ЭРЭ. Селекции подвергаются элементы, погрешности которых сильнее других влияют на производственные погрешности выходных параметров изделий.

Расчет допусков на производственные погрешности параметров схемных элементов проводится в два этапа. Вначале определяются допуски на параметры элементов, но при этом полагают, что погрешности сильновлияющих элементов $\delta\left(\frac{\Delta q_1}{q_1}\right)$ и $\delta\left(\frac{\Delta q_2}{q_2}\right)$ равны нулю. В этом случае допуск на выходной параметр $\delta'\left(\frac{\Delta \Pi_i}{\Pi_i}\right)$ будет меньше заданного даже при широких, экономически оправданных допусках на параметры рассчитываемых ЭРЭ:

$$\delta'\left(\frac{\Delta \Pi_i}{\Pi_i}\right)=\sqrt{\sum_{i=1}^{n-2} B_i^2 k_i^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)}\ . \qquad (44)$$

На втором этапе определяют допуски на параметры сильно влияющих элементов из равенства

$$\delta\left(\frac{\Delta \Pi_i}{\Pi_i}\right)_{\text{задан}} - \delta'\left(\frac{\Delta \Pi_i}{\Pi_i}\right) \geq \sqrt{B_1^2 k_1^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_1}{q_1}\right) + B_2^2 k_2^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_2}{q_2}\right)} \qquad (45)$$

методом последовательного подбора.

Преимуществом МГВ по сравнению с МПВ является возможность получения повышенной точности выходных параметров сборочных единиц.

При применении МГВ следует помнить, что увеличение числа селектируемых элементов и установление очень узких допусков на них может привести к значительному снижению экономичности метода. Поэтому при достижении требуемой точности по указан-

ному методу следует включать в сборочную единицу 1–2 селектируемых элемента и устанавливать допуски на их параметры, близкие к наименьшему производственному допуску на них (рис. 96).

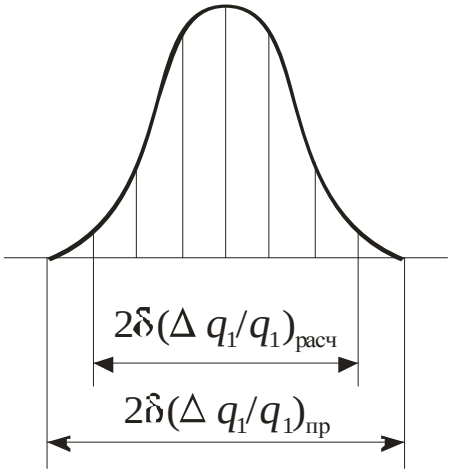


Рис. 96. Соотношение между расчетным и производственным допусками на селектируемый элемент

Метод подгонки

Сущность метода состоит в том, что требуемая точность выходных параметров функциональных узлов достигается подбором одного или нескольких схемных элементов с постоянными параметрами, применение которого в схеме узла обеспечивает частичную или полную компенсацию погрешностей выходных параметров.

Подбираемый элемент получил название компенсатора. В качестве компенсатора выбирают наиболее влияющий элемент, т.е. тот, который имеет наибольший коэффициент влияния.

Расчет точности выходных параметров функциональных узлов при подгонке производят с использованием допусков, указанных в ТУ.

Метод наиболее часто применяется для обеспечения узких производственных допусков на выходные параметры без селекции, а также для полной компенсации производственных погрешностей, когда суммарные допуски на выходные параметры в основном определяются температурными допусками и допусками на старение.

Недостатком метода является дополнительная работа по измерениям и подгонке выходных параметров функциональных узлов, которую обычно поручают рабочим высокой квалификации, а

также критичность компенсации и легкая возможность рекомендации, например, под влиянием внешних условий. Метод может быть рекомендован для использования в исключительных случаях.

Метод регулировки

Данный метод обеспечивает точность выходных параметров функциональных узлов изменением величины параметра компенсирующего элемента, для чего применяется специальный схемный элемент с переменными параметрами – регулировочный элемент.

Метод аналогичен подгонке, но в случае раскомпенсации есть возможность ее восстановления.

Регулировочный элемент позволяет корректировать выходные параметры также в процессе эксплуатации, т.е. компенсировать старение элементов.

Расчет точности параметров делают так же, как и в методе подгонки. Пользуясь системой уравнений погрешности выходных параметров функциональных узлов, определяют место регулировочного элемента в схеме и его тип, а затем выбирают пределы изменения параметра регулировки.

Недостатки: регулировочный элемент снижает надежность, так как его надежность значительно ниже элементов с постоянными параметрами за счет наличия токосъема, необходимости фиксации положения, трудности влагозащиты и т.п. Кроме того, наличие регулировочных элементов значительно усложняет ТП изготовления РЭС.

5.2. Методика расчета размерных цепей

Механическое соединение деталей в сборочные единицы сопровождается расчетами геометрической точности, основанными на теории размерных цепей.

Размерная цепь представляет собой совокупность взаимосвязанных звеньев (размеров), которые образуют замкнутый контур и непосредственно участвуют в решении определенной технологической задачи.

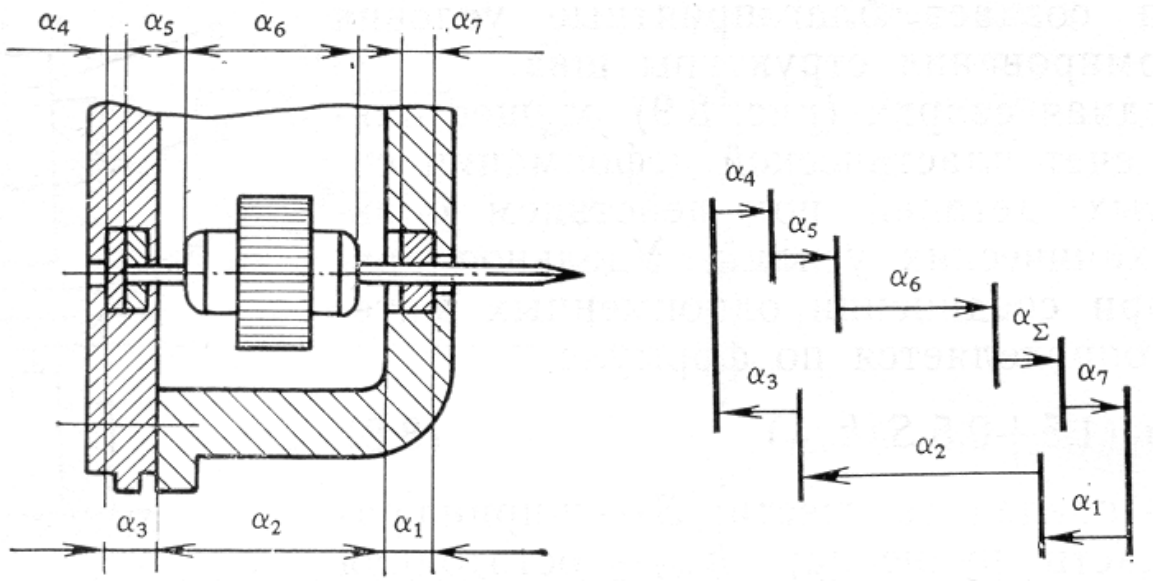
В зависимости от геометрии образованного контура размерная цепь бывает линейной, плоскостной или пространственной. Звенья размерной цепи разделяют на замыкающее (одно на цепь) и составляющие, которые, в свою очередь, бывают увеличивающие и

уменьшающие. Замыкающее звено определяется условиями поставленной задачи сборки, непосредственно не задается, а получается последним при ее решении.

Номинальный размер отклонения и поле допуска замыкающего звена являются функцией соответствующих звеньев. В сборочных цепях замыкающим звеном может быть зазор между деталями, смещение осей симметрии, поворот между поверхностями, перекрытие деталей и пр. Его отличительной особенностью является то, что номинальное значение размера может быть равным нулю.

Составляющими размерной цепи считаются звенья, функционально связанные с замыкающим и влияющие на него, степень и направление влияния между указанными звеньями определяются передаточным отношением (коэффициентом влияния).

Составляющие звенья называются увеличивающими, если с их увеличением увеличивается замыкающее звено, и уменьшающими – при обратном направлении влияния. На схемах размерных цепей (рис. 97) звенья изображают в виде векторов, причем увеличивающие и уменьшающие звенья обозначены стрелками, направленными в разные стороны.



а) *б*)

Рис. 97. Чертеж сборочной единицы (*а*) и размерной цепи (*б*)

Основное уравнение размерной цепи составляется по ее схеме и в общем случае имеет вид

$$A_1\alpha_1 + A_2\alpha_2 + ... + A_i\alpha_i + \alpha_\Sigma = 0, \qquad (46)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_i, \alpha_\Sigma$ – номинальные значения всех звеньев размерной цепи; $A_1, A_2, ..., A_i$ – передаточные отношения составляющих звеньев на замыкающее. Для линейных цепей с параллельными звеньями передаточные отношения равны:

$A_i = 1$ – для увеличивающих составляющих звеньев;

$A_i = -1$ – для уменьшающих составляющих звеньев.

В случае двух- и трехмерных цепей с линейными звеньями передаточные отношения равны косинусу угла между направлением звеньев a_i и направлением замыкающего звена α_Σ:

$$A_i = \cos(\alpha_\Sigma \alpha_i). \qquad (47)$$

Решая уравнение (46) относительно номинального размера замыкающего звена, получаем

$$\alpha_\Sigma = \sum_{i=1}^{m-1} A_i\alpha_i, \qquad (48)$$

где $i = 1, 2, \ldots, m$ – порядковый номер звена.

Для расчета размерных цепей используются два метода: максимума-минимума и вероятностный. Первый метод рекомендуется применять для малозвенных цепей высокой точности и для всех цепей малой точности, когда должна быть обеспечена полная взаимозаменяемость изделий. В этом случае максимальное (минимальное) значение размеров замыкающего звена α_Σ, координата середины поля допуска $\Delta_{0\Sigma}$, допуск на размер замыкающего звена δ_Σ рассчитываются по уравнениям

$$\alpha_\Sigma^{\max} = \sum_{i=1} A_i \vec{\alpha}_i^{\max} + \sum_{i=1} A_i \overleftarrow{\alpha}_i^{\min}; \qquad (49)$$

$$\alpha_\Sigma^{\min} = \sum_{i=1} A_i \vec{\alpha}_i^{\min} + \sum_{i=1} A_i \overleftarrow{\alpha}_i^{\max}; \qquad (50)$$

$$\Delta_{0\Sigma} = \sum_{i=1}^{m-1} A_i \Delta_{0i}; \qquad (51)$$

$$\delta_\Sigma = \sum_{i=1}^{m-1} |A_i| \ \delta_i, \qquad (52)$$

где Δ_{0i} и δ_i – координата середины поля допуска и допуск на размер составляющего звена цепи.

Если размерная цепь решена правильно, то выполняется условие

$$\delta_\Sigma = \alpha_\Sigma^{\max} - \alpha_\Sigma^{\min}. \qquad (53)$$

Достоинством метода максимума-минимума является простота выполнения расчетов, однако вследствие того, что сочетание крайних отклонений значений составляющих звеньев при сборке маловероятно, колебания замыкающего звена получаются больше действительных, а при расчете допусков на составляющие звенья по известному допуску на замыкающий размер они оказываются высокоточными.

Вероятностным методом рассчитываются размерные цепи, для которых экономически оправдан риск возможного выхода за пределы поля допуска размера замыкающего звена у части изделий. Решение получают по правилам суммирования случайных взаимозависимых величин. Координаты середины поля допуска замыкающего звена $\Delta_{0\Sigma}$ и допуска на размер замыкающего звена δ_Σ определяются из соотношений

$$\Delta_{0\Sigma} = \sum_{i=1}^{m-1} A_i(\Delta_{0i} + \beta_i\delta_i) - \beta_\Sigma\delta_\Sigma; \qquad (54)$$

$$\delta_\Sigma = \frac{1}{K_\Sigma}\sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} A_i^{\,2}\, K_i^2\delta_i^2}, \qquad (55)$$

где β_i, β_Σ– коэффициенты относительной асимметрии *i*-го звена и замыкающего; K_i, K_Σ – коэффициенты относительного рассеивания размеров *i*-го и замыкающего звеньев.

Таким образом, можно рассчитать величину замыкающего звена для произвольной размерной цепи.

5.3. Схемы базирования различных геометрических тел

Расчетный метод определения точности системы «станок–приспособление–инструмент–деталь» (СПИД) заключается в выяв-

лении всех факторов, влияющих на точность обработки, в определении имеющих место погрешностей, их суммировании и сравнении с заданным полем допуска.

Блок-схема факторов, влияющих на качество обрабатываемой детали, в общем виде представлена на рис. 98. Влияние этих факторов обусловливает появление погрешностей обработки.

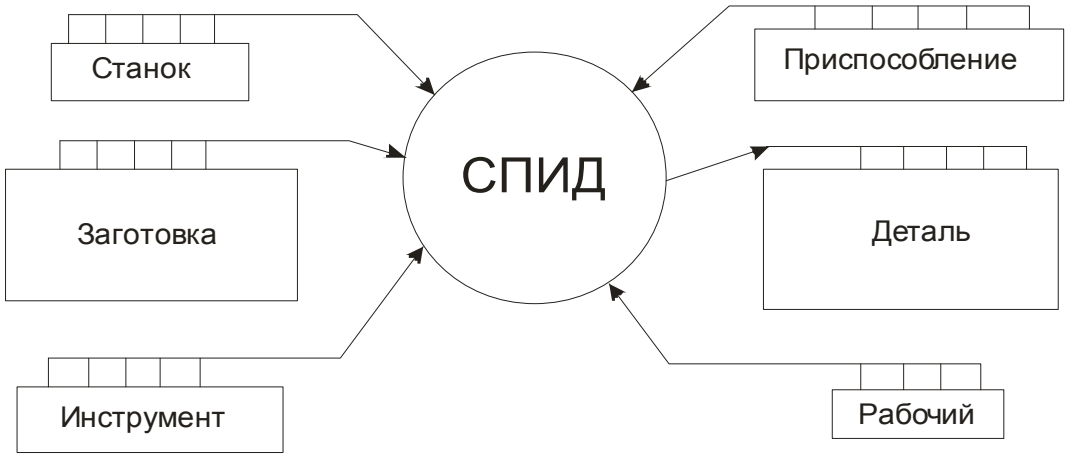


Рис. 98. Структура системы СПИД

Параметры, влияющие на точность системы СПИД, со стороны станка:

1) глубина резания;
2) подача;
3) скорость резания;
4) геометрическая точность;
5) жесткость;
6) температурные деформации.

Со стороны приспособления:

1) геометрическая точность;
2) жесткость;
3) точность установки;
4) температурные деформации.

Со стороны инструмента:

1) точность;
2) точность установки;
3) жесткость;

4) температурные деформации;

5) износ.

Со стороны детали:

1) размер;

2) погрешности формы;

3) погрешности взаимного расположения поверхностей;

4) качество поверхностей.

Со стороны заготовки:

1) форма;

2) твердость;

3) жесткость;

4) температурные деформации и внутренние напряжения.

Со стороны рабочего:

1) погрешность изготовления заготовки;

2) погрешность поднастройки станка.

К числу первичных погрешностей обработки относятся:

1) погрешность установки делали;

2) погрешность от упругих деформаций технологической системы СПИД;

3) погрешность настройки станка;

4) погрешность из-за геометрической неточности станков;

5) погрешность от износа режущего инструмента;

6) погрешность неточности изготовления режущего инструмента;

7) погрешность из-за температурных деформаций системы;

8) погрешность из-за остаточных напряжений в детали.

Рассмотрим погрешность установки детали. Неотъемлемой частью этого рассмотрения является базирование детали.

Перед обработкой заготовка должна быть установлена на станке в строго определенном положении. Отклонение фактически достигнутого положения заготовки или изделия при установке от требуемого называется погрешностью установки. Она состоит из погрешности базирования, погрешности положения заготовки и погрешности ее закрепления.

Для правильной и надежной установки и закрепления детали необходимо и достаточно устранить шесть степеней свободы ее

возможного перемещения, т.е. наложить шесть двусторонних геометрических связей (рис. 99).

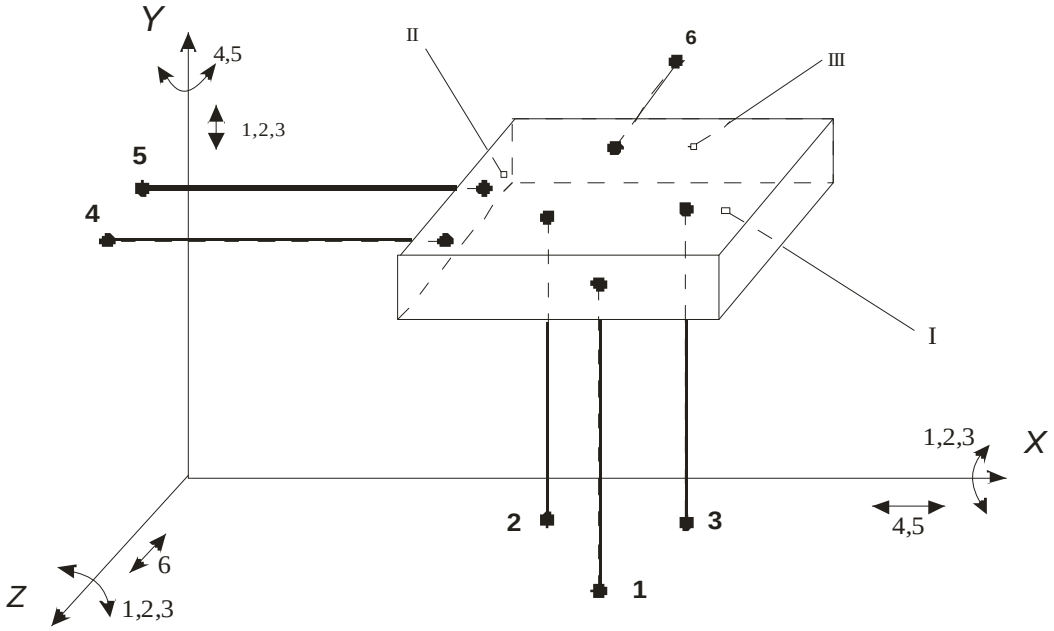


Рис. 99. Наложение двусторонних геометрических связей при базировании заготовки

Стрелками и арабскими цифрами показаны устраняемые перемещения, положения двусторонних связей. Наложение этих связей достигается через соприкосновение поверхности детали с поверхностями приспособления и приложения сил и пар сил, т.е. обеспечения так называемого силового замыкания. Это обеспечивает неразрывный контакт детали с опорными элементами приспособления.

Иными словами нам необходимо произвести базирование детали.

Базирование – это придание заготовке или изделию требуемого положения относительно выбранной системы координат.

База – это поверхность или выполняющее ту же функцию сочетание поверхностей, ось, точка, принадлежащая заготовке или изделию и используемая при базировании. Термины и определения по базированию даны в ГОСТ 21495–76.

Комплект баз – совокупность трех баз, образующих систему координат заготовки или изделия (см. рис. 99).

Базы подразделяются:

1. По назначению.

Конструкторская база – база, используемая для определения положения детали или сборочной единицы в изделии.

Основная база – конструкторская база, принадлежащая данной детали или сборочной единице и используемая для определения ее положения в изделии (рис. 100).

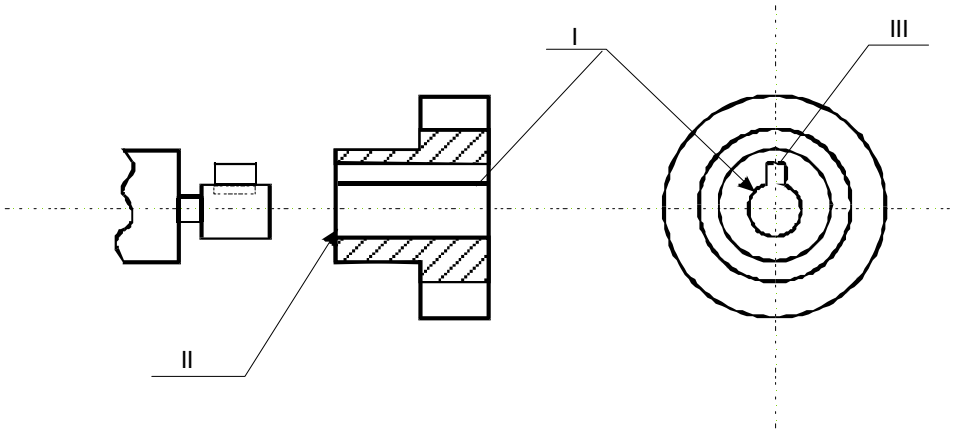


Рис. 100. Комплект основных баз I, II, III

Вспомогательная база – конструкторская база, принадлежащая данной детали или сборочной единице и используемая для определения положения присоединяемого к ним изделия (рис. 101).

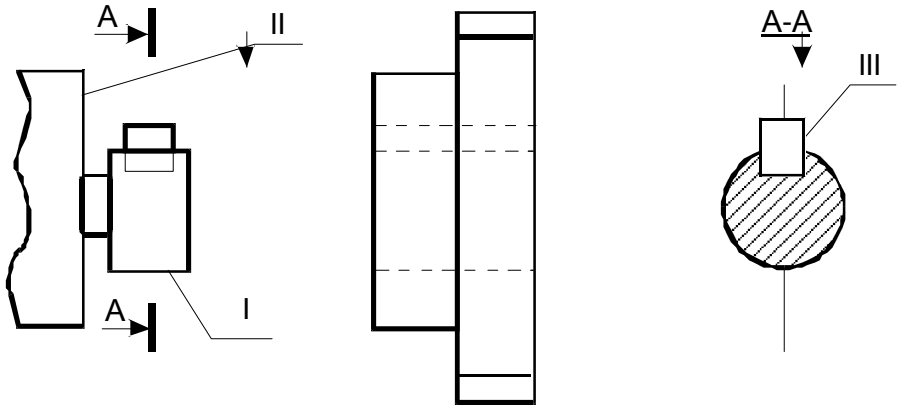


Рис. 101. Комплект вспомогательных баз

Технологическая база – это база, используемая для определения положения заготовки или изделия в процессе изготовления или ремонта, на эту базу деталь устанавливается при обработке.

Измерительная база – база, используемая для определения от-

носительного положения заготовки или изделия и средств измерения. От нее производится измерение детали (рис. 102).

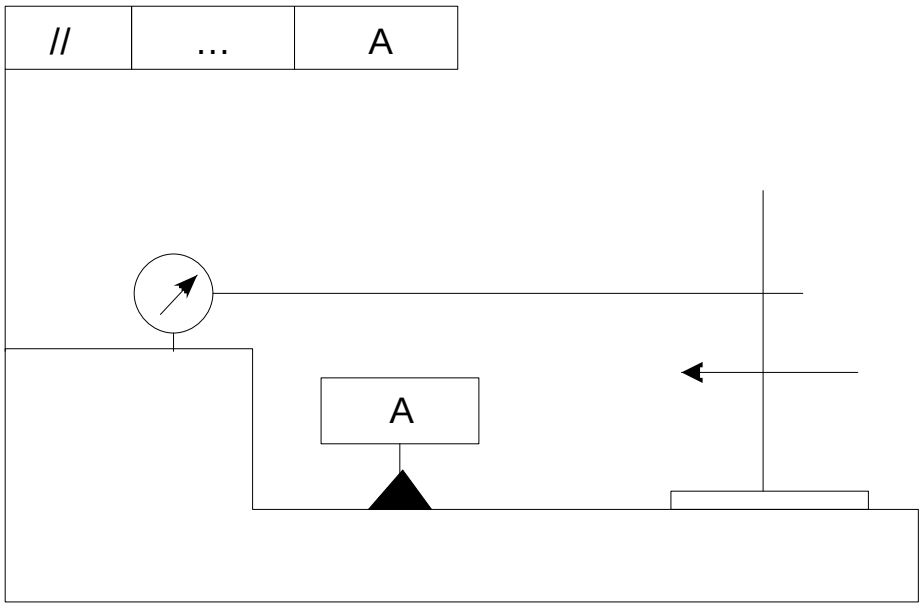


Рис. 102. Измерительная база

Для ее графического обозначения применяют зачерненный треугольник, который соединяют соединительной линией с рамкой допуска.

Если треугольник, указывающий базу, нельзя наглядно соединить с рамкой допуска, то базу обозначают прописной буквой и эту букву вписывают в третье поле рамки допуска.

2. По лишаемым степеням свободы.

Установочная база – база, лишающая заготовку или изделие трех степеней свободы – перемещения вдоль одной координатной оси и поворотов вокруг двух других осей – база I на рис. 102.

Направляющая база – база, лишающая заготовку или изделие двух степеней свободы – перемещения вдоль одной координатной оси и поворота вокруг другой оси – база II на рис. 102.

Опорная база – база, лишающая заготовку или изделие одной степени свободы – перемещения вдоль одной координатной оси или поворота вокруг оси – база III на рис. 102.

Двойная направляющая база – база, лишающая заготовку или изделие четырех степеней свободы – перемещений вдоль двух координатных точек и поворотов вокруг них (рис. 103).

Двойная опорная база – база, лишающая заготовку или изде-

лие двух степеней свободы – перемещений вдоль двух координатных осей (рис. 104).

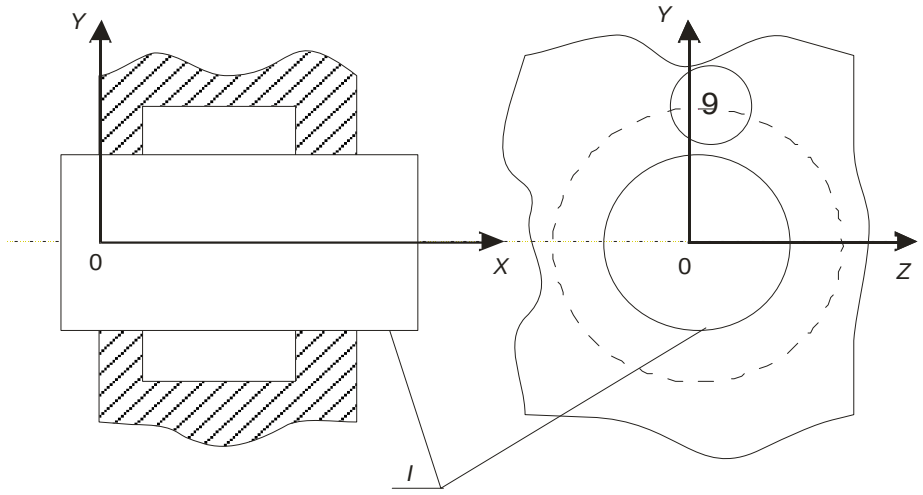


Рис. 103. Двойная направляющая база, лишающая перемещения вдоль *Y* и *Z* и поворота вокруг *Y* и *Z*

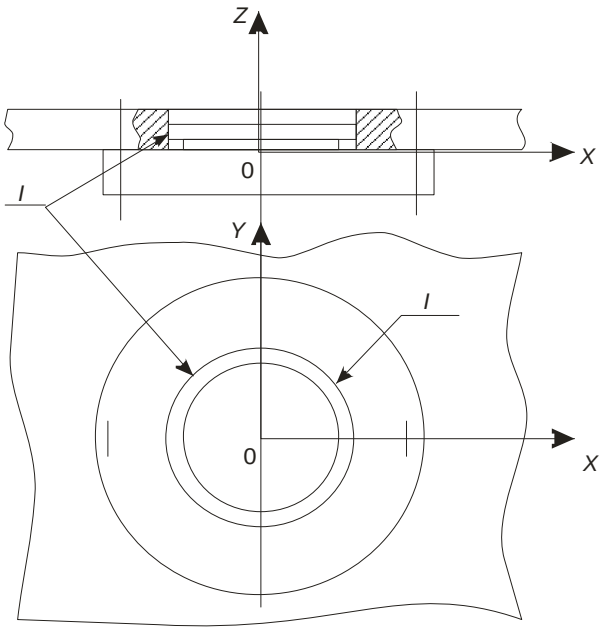


Рис. 104. Двойная опорная база

3. По характеру проявления.

Скрытая база – база, заготовки или изделия в виде воображаемой плоскости, оси или точки.

Явная база – база заготовки или изделия в виде реальной

поверхности, разметочной риски или точки пересечения рисок (рис. 105).

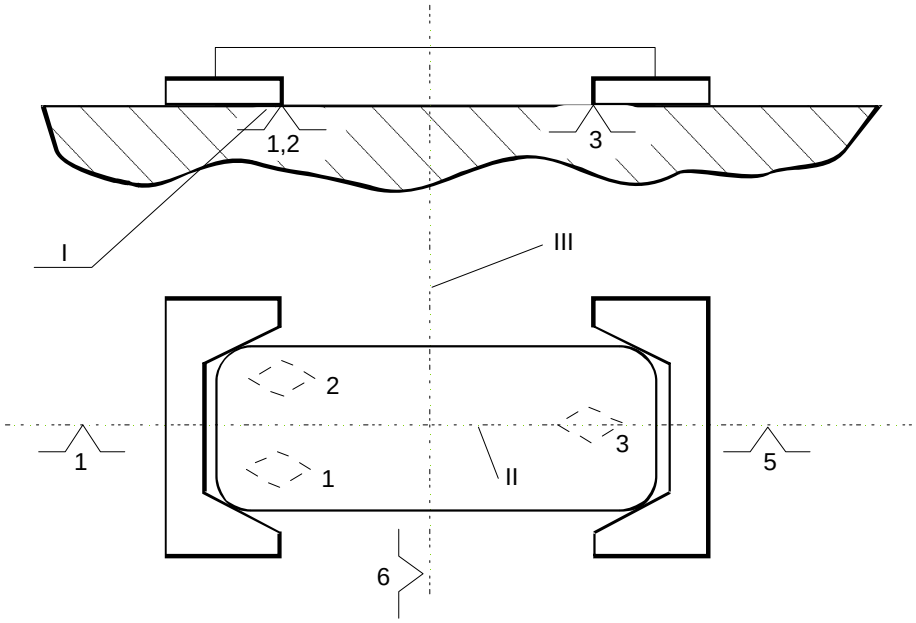


Рис. 105. Скрытая база

Схема базирования – схема расположения опорных точек на базах заготовки или изделия (рис. 106).

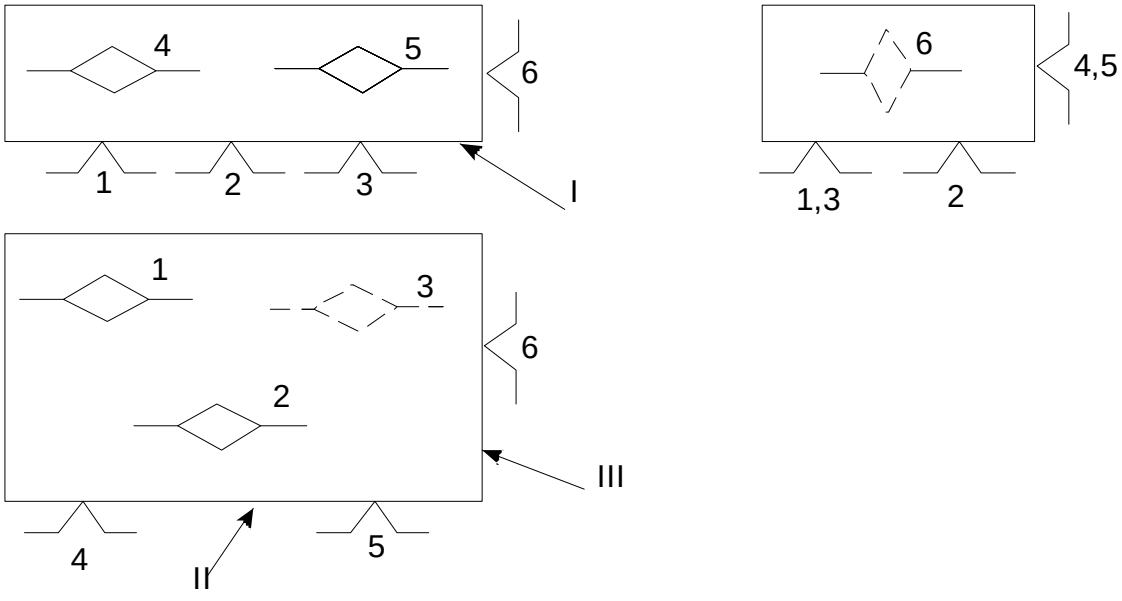


Рис. 106. Схема базирования призматической детали

Здесь I, II, III – базы детали, 1–6 опорные точки.

Все опорные точки на схеме базирования изображают услов-

ными знаками и нумеруют порядковыми номерами, начиная с базы, на которой располагается наибольшее количество опорных точек.

5.4. Производственные погрешности, причины возникновения, законы распределения

Любой ТП производства электронной аппаратуры характеризуется циклом последовательных операций изготовления деталей и сборочных единиц. На каждой операции неизбежно появляются некоторые колебания геометрических характеристик, режимов выполнения и физико-механических свойств материалов, которые отражают закономерности соответствующей операции и обусловлены комплексом случайных и систематических внешних и внутренних факторов, действующих в производстве. Они вызывают отклонение выходных параметров изделий.

Для нормального функционирования аппаратуры необходимо, чтобы отклонения параметров деталей, сборочных единиц и всего устройства в целом от номинальных находились в пределах, заданных в технической документации. Степень соответствия параметров изготовленных изделий установленным допускам определяет их технологическую точность.

Анализ точности производственного процесса позволяет для каждой технологической операции вскрыть причины возникновения производственных погрешностей, обосновать границы технологического допуска, правильно настроить ТП и выбрать экономичный метод достижения требуемой точности.

Под производственными погрешностями понимают отклонения параметров от номинальных данных, указанных в чертежах, нормалях, ТУ и другой технической документации, которые возникают при изготовлении деталей и сборочных единиц РЭА. Границы изменения параметров в процессе производства определяют технологические допуски, которые рассчитываются и устанавливаются заранее. В зависимости от того, какие параметры изделий они ограничивают, различают механические (геометрические) и электрические допуски.

Производственные погрешности подразделяются на систематические, которые вызываются детерминированными причинами и могут быть постоянными во времени или изменяться в пределах партии по определенному закону, и случайные, изменение величины и знака которых носит статистический характер.

Систематические погрешности вызываются следующими основными причинами:

1) методическими, которые возникают из-за ограниченных возможностей метода изготовления детали или контроля ее параметров, замены точных формул приближенными при технологических расчетах;

2) неточностью изготовления оснастки и рабочего инструмента;

3) деформацией и износом оборудования, оснастки и инструмента;

4) температурными воздействиями на деталь или сборочную единицу в зоне обработки.

Случайные производственные погрешности определяются:

1) неоднородностью сырья и отклонениями параметров комплектующих изделий (резисторов, конденсаторов, транзисторов, ИС и др.);

2) колебаниями технологического режима обработки;

3) субъективными данными рабочих и т.д.

Для описания производственных погрешностей используются следующие законы распределения: Гаусса, равновероятный, обобщенный типа А (Шарлье), эксцентриситета, экспоненциальный, некруглости, модуля разности и др.

Распределение производственных погрешностей подчиняется закону Гаусса при соблюдении следующих условий:

1) общая погрешность представляет сумму частных погрешностей, вызванных действием значительного числа случайных факторов и некоторого числа первичных систематических факторов;

2) среди частных погрешностей нет доминирующих, т.е. влияние на общую погрешность одного порядка;

3) все случайные факторы взаимно независимы;

4) число случайных факторов и параметры вызванных ими частных погрешностей не изменяются во времени;

5) число систематических факторов и значения вызванных ими частных погрешностей остаются одинаковыми.

Такие условия создаются при массовом производстве деталей и сборке аппаратуры на автоматически работающем оборудовании.

Если среди причин, вызывающих производственные погрешности, имеется резко доминирующий фактор (например, износ ин-

струмента), равномерно изменяющийся во времени, то полное рассеивание отклонений одной производственной партии соответствует закону равной вероятности (рис. 107).

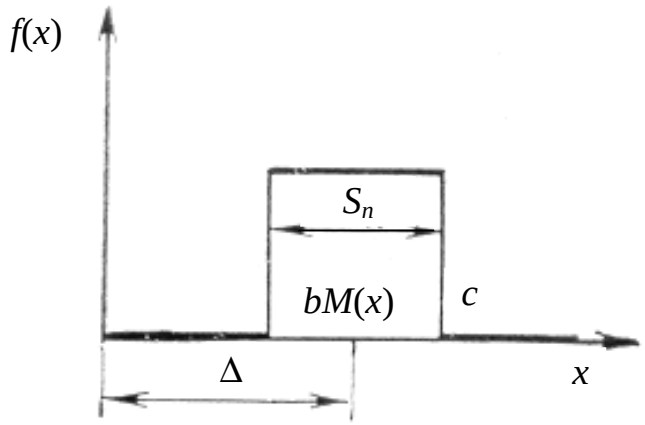


Рис. 107. Кривая распределения случайной величины, подчиняющейся закону равной вероятности

Плотность распределения закона равной вероятности описывается уравнением

$$f(x) = 1/(c-b), \qquad (56)$$

где с и b – границы изменения значений случайной величины.

Этот закон характеризуется также двумя параметрами – средним значением и среднеквадратическим отклонением. Полное поле рассеивания погрешностей для закона равной вероятности при $P = 0{,}9973$

$$S_n = 3{,}464\sigma. \qquad (57)$$

Когда распределение производственных погрешностей значительно отличается от гауссовского, применяется обобщенный закон типа A (на рис. 108, 109 пунктирной линией показана кривая нормального закона распределения). Аналитическое выражение плотности распределения обобщенного закона типа A имеет вид

$$f_A(x) = f(x) - \frac{r_3}{6} f^{\,\mathrm{III}}(x) + \frac{r_4 - 3}{24} f^{\,\mathrm{IV}}(x), \qquad (58)$$

где $f(x)$ – плотность распределения нормального закона; $f^{\text{III}}(x)$, $f^{\text{IV}}(x)$ – производные третьего и четвертого порядков $f(x)$; r_3, r_4 – основные моменты третьего и четвертого порядков.

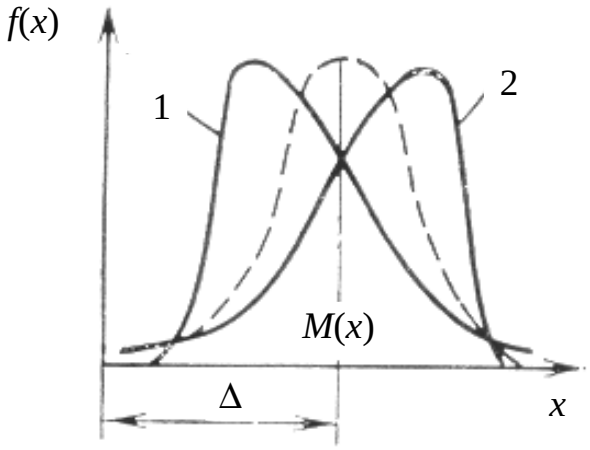


Рис. 108. Кривые плотности вероятности с положительным (1) и отрицательным (2) коэффициентом асимметрии

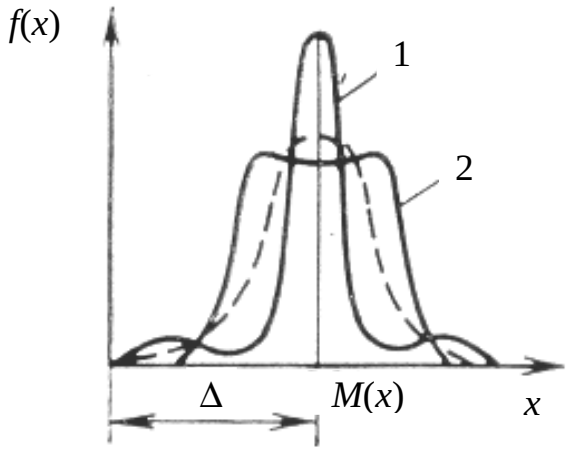


Рис. 109. Кривые плотности вероятности с положительным (1) и отрицательным (2) эксцессом

Обобщенный закон типа *A* характеризуется четырьмя параметрами: средним значением $M(x)$, среднеквадратическим отклонением σ, коэффициентом асимметрии (мера косости) α и эксцессом

(мерой крутости) τ. Последние два параметра определяются по формулам

$$\alpha = r_3; \tag{59}$$

$$\tau = r_4 - 3. \tag{60}$$

Полное поле рассеивания погрешностей случайной величины для обобщенного закона типа A находится из равенства

$$S_n = t\sigma, \tag{61}$$

где t – безразмерная дробь, которая определяется по таблицам математической статистики в зависимости от величины и знака эксцесса τ.

5.4.1. Точность обработки. Производственные погрешности

На рабочих чертежах деталей, операционных эскизах и других технических документах размеры указывают в виде номинального значения и допустимых отклонений, например: D_{-b}^{+a}, где D – номинальное значение размера; a – верхнее отклонение; b – нижнее отклонение. Разность верхнего и нижнего отклонений называют допуском $\delta = a - (-b) = a + b$.

Номинальные значения размеров определяют при конструировании деталей теоретическим расчетом и округляют до ближайших целых значений, нормированных ГОСТ 6636–69.

Применение стандартных номинальных значений размеров дает возможность ограничить номенклатуру режущего и измерительного инструмента в производстве изделий, сократить потребляемый ассортимент материалов, а следовательно, снизить расходы на изготовление деталей.

Весьма важными геометрическими параметрами являются отклонения формы и расположения поверхностей деталей. К числу таких параметров относятся неплоскостность, непрямолинейность, некруглость, несимметричность, несоосность и др. Определение этих параметров и их допустимые отклонения нормированы ГОСТ 10366–63. Номинальные значения этих параметров приняты равными нулю, и в стандарте нормированы только их предельные отклонения. Детали, имеющие отклонение действительных

геометрических параметров в пределах допусков, предусмотренных чертежом, считаются годными и направляются на сборку. Детали, действительные геометрические параметры которых выходят за пределы допусков, указанных в чертеже, считаются браком производства и к сборке не допускаются.

Геометрическая точность деталей радиоэлектронной аппаратуры является весьма важным количественным критерием оценки их качества. Как известно, назначаемая при конструировании точность размеров определяется служебной функцией детали в изделии и в ряде случаев необходимостью обеспечения взаимозаменяемости и экономической эффективности производства.

В основе технологических операций обработки, как правило, лежит теоретическая модель процесса, однако реальное исполнение процесса всегда отличается от теоретического вследствие целого ряда внешних воздействий, т.е. причин, вызывающих отклонение реального процесса от теоретического. Применительно к способам обработки изделий на металлорежущих станках эти причины называют технологическими факторами, а их влияние на результаты формирования обрабатываемых поверхностей – погрешностью обработки. Таким образом, технологические факторы являются причинами, а погрешность обработки – следствием, сопровождающим всякий технологический процесс формообразования деталей. Однако необходимо отметить, что функциональная зависимость между погрешностью обработки как следствием и технологическими факторами как причинами не всегда может быть выражена аналитически, и это создает определенные трудности в проектировании и организации процессов формообразования деталей – процессов обработки.

Процессы обработки деталей на металлорежущих станках сопровождаются большим количеством технологических факторов, влияющих на точность обработки, изучению которых посвящены труды многих советских ученых: Н. А. Бородачева, А. П. Соколовского, А. Б. Яхина, В. С. Корсакова, А. И. Гаврилова, А. Н. Малова и многих других.

В общем виде технологические факторы могут быть разделены на три группы:

1) факторы, обусловленные неточностью функциональных узлов и деталей технологического оборудования и оснастки;

2) факторы, обусловленные упругими деформациями деталей системы СПИД;

3) факторы, обусловленные отклонениями в регулировании и управлении технологической системой.

Основные технологические факторы при обработке на металлорежущих станках:

1) отклонение геометрической формы рабочих поверхностей шпинделя станка (некруглость, отклонение профиля в продольном сечении), направляющих станины (неплоскостность, непараллельность);

2) отклонение во взаимном расположении рабочих поверхностей шпинделя и станины (непараллельность, неперпендикулярность);

3) деформация изгиба основных деталей станка под воздействием внешних сил во время работы;

4) отклонение геометрических параметров формы и расположения рабочих поверхностей режущего инструмента;

7) неточность установки детали в позицию обработки;

6) изменение размеров инструмента под воздействием тепла, выделяемого в зоне резания;

7) неточность установки детали в позицию обработки;

8) упругая деформация заготовки под воздействием сил связи, сил резания, сил, вызываемых неравномерностью внутренних напряжений, и др.;

9) погрешность настройки режущего инструмента на исполняемый размер;

10) неточность измерительных инструментов;

11) ошибки при измерении операционного размера;

12) изменение в процессе обработки геометрических параметров инструмента вследствие износа и др.

Здесь приведен неполный перечень первичных технологических факторов, свойственных процессам обработки резанием. Многие из этих факторов присущи и другим способам обработки, таким как холодная штамповка, обработка ультразвуком, электроискровая обработка и др. Таким образом, для достижения высоких классов точности (квалитетов) и шероховатости поверхностей необходимо свести к минимуму влияние технологических факторов. Эта задача

решается созданием металлообрабатывающих станков и технологической оснастки высокой точности, применением автоматических измерительных устройств, управляющих положением режущего инструмента относительно обрабатываемой поверхности (средства активного контроля), применением расчетов технологических операций на точность.

При проектировании технологических процессов, а также при освоении производства новых деталей необходимо знать ожидаемую погрешность обработки. Для расчета ожидаемой погрешности обработки применяются два метода: аналитический и математической статистики. Оба метода предполагают следующие виды производственных погрешностей: систематические постоянные, систематические переменные, случайные.

Систематические постоянные производственные погрешности заметно не изменяются во времени, например, вызванные некруглостью (эллипсностью или огранкой) рабочих шеек шпинделя станка; неточностью координат отверстий, направляющих втулок кондуктора и т.п.

Систематические переменные, производственные погрешности изменяются по величине и направлению в процессе каждого цикла обработки, например, вызванные износом режущего инструмента. В некоторых случаях числовые значения систематических погрешностей могут быть заранее рассчитаны аналитически или обнаружены соответствующими измерениями. А это почти всегда означает, что их можно устранить полностью или частично.

Случайные производственные погрешности возникают в результате не всегда известных факторов, их числовое значение и время появления определить не всегда возможно. К числу таких погрешностей можно отнести погрешность установки детали на станке, рассеяние диаметров отверстий, обработанных одной разверткой, рассеяние размеров детали, прессуемой в одной пресс-форме, и др. Определение влияния действия случайных производственных факторов на погрешность (точность) обработки достигается методом математической статистики.

5.5. Влияние шероховатости поверхностей на точность изделия

К числу показателей качества деталей относят параметры, характеризующие состояние микрогеометрии поверхности: среднее арифметическое отклонение профиля R_a; высоту неровностей профиля по десяти точкам R_z; наибольшую высоту профиля R_{max}; средний шаг неровностей по средней линии S_m; средний шаг неровностей по вершинам профиля 5; относительную опорную длину профиля t_p. Определение параметров и их числовые значения для различных классов шероховатости поверхности даны в ГОСТ 2789–73, здесь же нормированы типы неровностей (преобладающие направления следов инструмента на поверхности). В ГОСТ 2.309–73 установлены стандартные обозначения шероховатости поверхности на чертежах деталей.

Степень (класс) шероховатости рабочих поверхностей детали оказывает существенное влияние на такие эксплуатационные свойства, как износостойкость, электропроводность, отражательная способность, сопротивление коррозии, адгезия и т.п.

Влияние шероховатости на износ трущихся поверхностей деталей. В начальный период работы $\tau_п$ износ поверхностей весьма интенсивен. После окончания периода приработки шероховатость поверхностей уменьшается и интенсивный износ прекращается – наступает длительный период нормального износа $\tau_н$, за которым следует интенсивный износ – разрушение $\tau_р$. Однако снижение шероховатости поверхностей с целью повышения их износостойкости оправдывается не всегда. В некоторых случаях наилучшие условия для смазки и уменьшения износа обеспечиваются определенной оптимальной шероховатостью.

Влияние шероховатости на коррозию. Коррозия протекает наиболее активно во впадинах рельефа, она интенсивно распространяется по микротрещинам в глубь металла, что приводит к разрушению поверхностного слоя. Снижение шероховатости замедляет течение коррозии.

Влияние шероховатости на усталостную прочность. Сопротивление металлических деталей разрушению под действием переменной нагрузки возрастает с уменьшением шероховатости поверхности. Усталостная прочность хорошо отполированной детали из легированной стали на 30–40 % выше, чем у грубо обработанной. Глубокие царапины, риски и трещины ослабляют поверхностный слой металла, снижают его усталостную прочность.

Влияние шероховатости на точность обработки. Между точностью обработки и шероховатостью поверхности существует определенная взаимозависимость, выражающаяся в том, что высокой точности обработки соответствует низкая шероховатость.

В табл. 33 представлена взаимосвязь между методами обработки, достижимой точностью размеров и шероховатостью обрабатываемых поверхностей деталей, изготовленных из конструкционных сталей.

Таблица 33

Соответствие класса шероховатости классу точности

Метод обработки	Класс	
	точности	шероховатости
Точение: предварительное; чистовое; тонкое	 5 3 2–1	 4 6–7 9
Фрезерование: предварительное; чистовое; тонкое	 5 3 2	 4 6–7 8–9
Протягивание отверстий	3–2	7–8
Сверление: чистовое; зенкерование	 4–5 4	 3–5 5–6
Развертывание: предварительное; окончательное; тонкое	 3 2 2–1	 6 7–8 9
Шлифование: чистовое; тонкое	 3–2 2	 8–9 9–10
Притирка	1	10–12

Если по условиям эксплуатации деталей не требуется высокая точность, но необходима низкая шероховатость поверхности (например, для придания поверхности высокой отражательной способности), то соотношения между точностью обработки и классом

шероховатости могут не соответствовать табл. 33. Снижения шероховатости поверхности в таких случаях достигают полированием.

В табл. 34 приведена взаимосвязь эксплуатационных свойств с параметрами шероховатости поверхности.

Методы измерения шероховатости поверхности по принципу действия делятся на контактные и бесконтактные.

Контактные методы состоят в непосредственном измерении неровностей, что выполняется ощупыванием исследуемой поверхности алмазной иглой с весьма малым радиусом закругления острия.

Таблица 34

Взаимосвязь эксплуатационных свойств с параметрами шероховатости

Требования к поверхности	Параметры шероховатости, определяющие качество поверхности
Износостойкость при всех видах трения и направление неровностей	R_a, R_z, t_p
Виброустойчивость и направление неровностей	R_a, R_z, t_p
Контактная жесткость	R_a, (R_z), t_p
Прочность сопряжения	R_a, (R_z)
Прочность детали при циклических нагрузках и направление неровностей	$R_{\max}$, S_m, S
Геометричность сопряжения	R_a, (R_z), $R_{\max}$, t_p
Сопротивление в волноводах	R_a, S_m, S

Бесконтактные методы основаны на косвенном измерении неровностей с последующей математической обработкой результатов измерения. В этом случае высоту неровностей определяют с помощью специальных оптических приборов.

5.6. Аналитический метод расчета ожидаемой точности обработки

Аналитический метод дает возможность при проектировании технологического процесса без экспериментальной проверки принять такой вариант обработки, который гарантирует получение требуемой точности.

Сущность этого метода состоит в составлении теоретической схемы процесса, построении ее математической модели, определении численного значения производственной погрешности и нахождении зависимости между производственной погрешностью и погрешностью обработки. Если расчетная погрешность обработки больше допустимой по чертежу детали, то необходимо принимать меры к повышению точности обработки и обеспечению условий работы без брака, что выражается неравенством $\Delta L \le \delta L$, где ΔL – погрешность действительного значения размера L; δL – допуск по чертежу на размер L.

К числу производственных погрешностей, поддающихся аналитическому расчету, относятся: упругая деформация элементов системы станок – приспособление – инструмент – деталь (СПИД); погрешность базирования детали на станке и др. Во многих случаях они являются доминирующими.

Расчет погрешности обработки, вызываемой упругой деформацией элементов системы СПИД. При обработке цилиндрической поверхности детали, закрепленной одним концом в трехкулачковом патроне токарного станка (рис. 110), система СПИД подвергается упругой деформации. При этом обрабатываемая деталь деформируется, как консоль, на свободный конец которой действует радиальная составляющая силы резания P_y. Если жесткость детали много меньше жесткости шпинделя и суппорта, то для расчета погрешности можно применять эквивалентную схему (рис. 111), позволяющую найти упругую деформацию по формуле

$$y = P_y l^3 \big/ 3EJ , \qquad (62)$$

где E – модуль упругости материала обрабатываемой детали, Па (кгс/мм^2); J – момент инерции поперечного сечения детали относительно геометрической оси, мм^4 (для детали круглого сечения $J = \pi d^4 \big/ 64$).

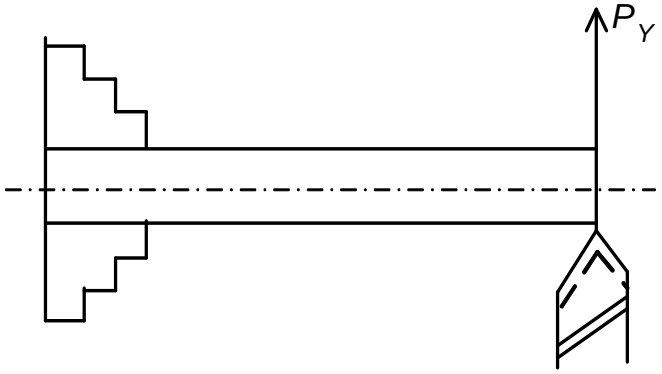


Рис. 110. Эпюры сил резания

Жесткость j упругой системы – это отношение составляющей силы резания (действующей в плоскости, перпендикулярной обрабатываемой поверхности) к упругой деформации y детали в направлении действия силы:

$$j = Py / y,$$

откуда $y = P_y / j$.

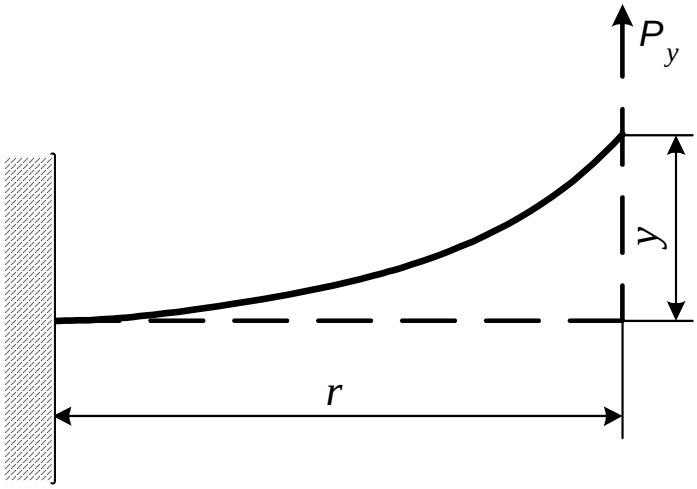


Рис. 111. Изменение упругой деформации

Это уравнение дает возможность проверить расчетное значение упругой деформации экспериментально. Такая проверка целесообразна, если жесткость шпинделя станка соизмерима с жесткостью обрабатываемой детали.

При консольном закреплении детали погрешность обработки, вызываемая упругой деформацией системы СПИД, характеризуется отклонениями профиля продольного сечения и диаметрального размера по длине детали (рис. 112). Определим погрешность размера

$$\Delta D = D_{\max} - D_{\min} = 2y\,. \qquad (63)$$

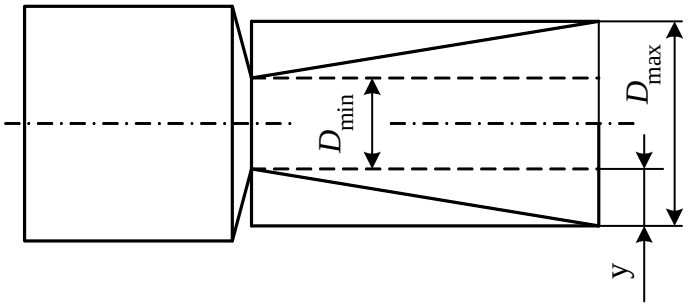


Рис. 112. Погрешность токарной обработки
при консольном закреплении

Для данного случая условие обработки без брака определяется неравенством

$$\Delta D \le \delta D\,,$$

где δD – допуск на размер D по чертежу детали.

Уравнение (63) выражает функциональную зависимость погрешности обработки от технологических факторов.

При обработке цилиндрических деталей на токарных и шлифовальных станках с установкой в центрах доминирующей производственной погрешностью при определенных условиях может стать деформация заготовки. Схема обработки на токарном станке в центрах представлена на рис. 113. Под воздействием составляющей силы резания P_y система СПИД подвергается упругой деформации. Если жесткость обрабатываемой детали меньше жесткости других звеньев системы СПИД, то деталь можно рассматривать как балку, лежащую на двух опорах, на которую воздействует сила P_y (рис. 114), тогда упругая деформация детали определится уравнением

$$y = P_y l^3 \big/ (48EJ)\,.$$

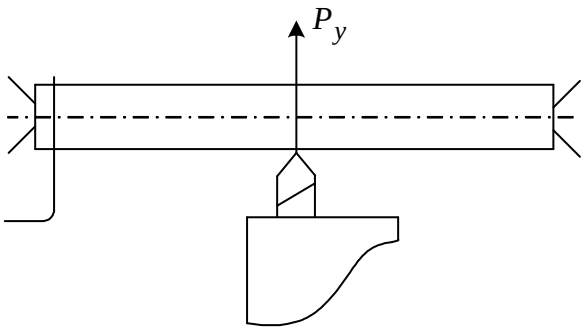


Рис. 113. Схема обработки на токарном станке в центрах

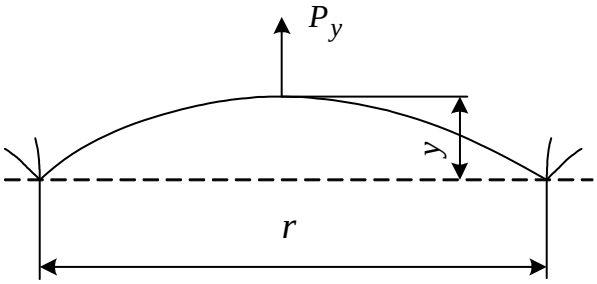


Рис. 114. Изменение упругой деформации при закреплении в центрах

Жесткость детали определяется уравнением $j = 48EJ/l^3$.

Максимальная упругая деформация детали, закрепленной в центрах, должна находиться на середине ее длины. Однако наличие поводка не позволяет проточить деталь до конца. Вследствие этого поперечное сечение, соответствующее максимальному прогибу, смещается в сторону обрабатываемого конца и после обработки деталь будет иметь форму, показанную на рис. 115. В этом случае погрешность обработки $\Delta D = D_{\max} - D_{\min}$.

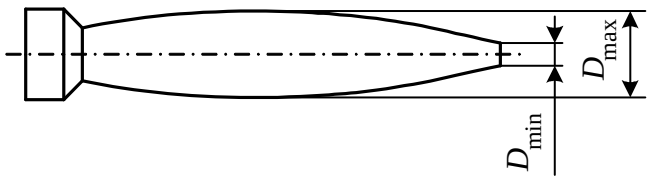


Рис. 115. Погрешность токарной обработки при закреплении в центрах

Условие обработки без брака характеризуется неравенством $\Delta D \le \delta D$.

5.7. Технологические процессы и качество. Влияние технологии производства на надежность радиоэлектронных средств

Качеством деталей называют совокупность их свойств, обусловливающих пригодность деталей надежно выполнять соответствующие функции в сборочных единицах, приборах, аппаратах и других изделиях радиоэлектроники.

Качество деталей характеризуют показателями качества, представляющими собой количественные характеристики свойств деталей. К числу таких показателей относятся геометрические параметры, параметры микрогеометрии поверхностей деталей, физические параметры материала и т.п.

К геометрическим параметрам качества относят точность размеров детали, точность формы поверхностей, точность расположения поверхностей деталей относительно конструкторских баз. К параметрам микрогеометрии поверхностей относят числовые характеристики шероховатости, предусмотренные ГОСТ 2789–73. К физическим параметрам материала деталей относят: твердость, прочность, пластичность, электропроводность, магнитную проницаемость, коэрцитивную силу и др.

Уровнем качества изделий называют относительную характеристику свойств изделия, основанную на сравнении совокупности показателей качества с соответствующей совокупностью показателей базового изделия (прототипа, аналога или эталона).

Управление качеством представляет собой систему мероприятий, проводимых на стадии проектирования, изготовления и эксплуатации изделий. Управление качеством деталей на стадии конструирования состоит в отработке технологичности конструкции, в обеспечении требований, предъявляемых к детали ее назначением. На стадии технологического проектирования управление качеством состоит в предопределении возможностей изготовления деталей с параметрами качества, заданными чертежом и техническими требованиями, при определенном уровне эффективности производства.

Экономическая эффективность технологического процесса тесно связана с уровнем качества. Повышение уровня качества изделий достигается либо повышением трудоемкости, либо повышением капитальных вложений в технологическое оборудование, оснастку и др. Себестоимость изготовления деталей возрастает с по-

вышением точности геометрических и физических параметров качества и снижением шероховатости поверхностей.

Технологический процесс изготовления, сборки и контроля изделия РЭС должен с наименьшими затратами времени и средств обеспечить требуемый уровень качества продукции, включая и надежность. Однако связь параметров ТП с надежностью готового изделия весьма сложна и, кроме того, требования надежности, как правило, вступают в противоречие с такими основными требованиями ТП, как его производительность и экономичность. При осуществлении ТП стремятся его оптимизировать и тем самым обеспечить требуемый уровень качества и высокую производительность. Поэтому надежность ТП должна быть обеспечена как по качественным, так и по количественным показателям. С учетом вышеизложенного надежность ТП – это его свойство обеспечить изготовление продукции в заданном объеме, сохраняя во времени установленные требования к ее качеству. Таким образом, ТС должна быть работоспособна как по показателям качества, так и по производительности.

Основные принципы разработки и реализации технологических процессов – это обеспечение возможности изготовления изделий высокого качества при заданном уровне экономической эффективности производства.

Контролируя технологическую точность изготовления РЭС на каждой операции, необходимо стремиться к тому, чтобы параметры качества оставались стабильными в условиях серийного производства. Поэтому ТП сборки РЭС должен быть не только точным, но и надежным.

Надежность – понятие динамическое. Поэтому точность следует рассматривать как составную часть свойств надежности ТС.

В понятие надежность функционирования РЭС входят:

- вероятность безотказной работы;
- среднее время наработки на отказ;
- среднее время восстановления работоспособности;
- долговечность и т.д.

Надежность изделия закладывается в процессе его конструирования и расчета, а специфические условия обеспечения высокой надежности РЭС и заданных характеристик в условиях эксплуатации обусловливают высокие требования к качеству используемых материалов, оборудования и к технологическому процессу изготов-

ления электронной аппаратуры. Рациональная организация производственного процесса невозможна без проведения тщательной технологической подготовки производства (ТПП), которая должна обеспечивать полную технологическую готовность предприятия к производству качественных изделий РЭС в соответствии с заданными технико-экономическими показателями, устанавливающими высокий технический уровень и минимальные трудовые и материальные затраты. Необходимо стремиться применять те компоненты и элементы, которые показали наилучшие результаты в случаях, аналогичных конструируемому изделию. Разработка приборов и приборных комплексов доказывает, что при использовании унифицированных компонентов, деталей, узлов и элементов резко повышается надежность изделия. Это связано с тем, что унифицированные элементы лучше отработаны в схемном и конструктивном отношении и имеют установившуюся и хорошо контролируемую технологию изготовления. При оценке влияния технологии производства на надежность конструкции пользуются двумя методами:

1) улучшение технологического обеспечения производства на тех стадиях процесса изготовления, которые в явной форме влияют на надежность конкретного изделия. Эта тенденция не должна являться безусловным правилом, так как влияние технологии на надежность изделия характеризуется комплексными показателями, выполнение требований которых во многих случаях является задачей оптимизации, решаемой в теоретическом плане на ЭВМ;

2) вероятностный подход к оценке влияния технологии на надежность изделий, который диктует конструкторская теория надежности, базирующаяся на основах теории вероятностей, математической статистики и теории случайных чисел.

Пока не выработано единых показателей надежности, общих для радиоэлектронного производства. Однако показатели надежности массового и серийного производства отличаются в ряде случаев от показателей надежности в единичном и мелкосерийном производстве. Надежность ТП производства простейших механических и электронных устройств в основном характеризуется количеством брака в партии. Этот показатель используется при производстве комплектующих элементов, электроизмерительных приборов, коммутационной аппаратуры и др. Для сложных радиоэлектронных комплексов, выпускаемых мелкими сериями или поштучно, показатели надежности ТП тесно связаны с основной характеристикой изделия, с его надежностью в процессе эксплуатации. Надежность ТП

оказывает в данном случае хотя и косвенное, но решающее влияние на надежное функционирование изделий и определяется надежностями входного контроля покупных базовых элементов и устройств, ТП окончательной сборки, процессов контроля и испытаний.

Для расчета показателей надежности разделим весь ТП на фазы: входного контроля, сборки и монтажа, выходного контроля. Так как качественное изделие в результате изготовления получается только в том случае, если оно будет качественным в результате прохождения каждой из фаз процесса, то надежность ТП в целом

$$\text{Н}_{\text{тп}} = \text{Н}_{\text{к}}\text{Н}_{\text{сб}}\text{Н}_{\text{к}}^{\text{вх}}, \qquad (64)$$

где $\text{Н}_{\text{к}}$ – надежность входного контроля; $\text{Н}_{\text{сб}}$ – надежность процесса сборки и монтажа; $\text{Н}_{\text{к}}^{\text{вх}}$ – надежность выходного контроля.

Надежность входного контроля определяется рядом факторов: методом контроля (ручной, автоматический, стопроцентный, выборочный), скоростью его проведения, сроком службы контрольного оборудования, продолжительностью непрерывной работы контролера и др.

Вероятность ошибки контроля изделий можно определить как

$$P_K = \int_0^n P_0(\upsilon, T)dn, \qquad (65)$$

где υ – скорость испытаний; T – срок службы контрольного оборудования; P_0 – вероятность ошибки, характеризующая метод контроля.

При стопроцентном контроле выражение надежности имеет вид

$$\text{Н}_{\text{к}} = 1 - P_{\text{к}} = \int_0^n P_0(\upsilon, T)dn. \qquad (66)$$

Надежность выборочного контроля определяется соотношением

$$\text{Н}_{\text{вк}} = \text{Н}_{\text{к}}\text{Н}_{\text{в}} = (1 - P_{\text{к}})(1 - P_{\text{к}}^1), \qquad (67)$$

где $\text{Н}_{\text{к}}$ – надежность методики выборочного контроля; $\text{Н}_{\text{в}}$ – надежность контроля непосредственно выборки; $P_{\text{к}}^1$ – вероятность брака в выборке n_1.

Надежность многооперационного процесса сборки равна произведению надежностей отдельных операций Н_i:

$$Н_{сб} = \prod_{i=1}^{k} Н_{оп i} . \quad (68)$$

Считая в первом приближении надежности технологических операций на каждом рабочем месте приблизительно равными, получаем надежность всего процесса сборки

$$Н_{сб} = (1 - P_{оп})^n . \quad (69)$$

Рассчитав вероятности появления брака на всех фазах ТП изготовления РЭС в соответствии с выражением (64), производят оценку его надежности.

Контролируя технологическую точность изготовления РЭС на каждой операции, необходимо стремиться к тому, чтобы параметры качества оставались стабильными в условиях серийного производства. Поэтому ТП сборки РЭС должен быть не только точным, но и надежным.

Определительные испытания на надежность

Определительные испытания объектов проводятся с целью определения фактических значений показателей их надежности с заданной точностью и доверительной вероятностью.

Перед проведением испытаний производят планирование, которое включает в себя определение объема выборки N – количества объектов, участвующих в испытаниях; процедуры проведения испытаний; значений критериев окончания испытаний; коэффициентов и квантилей, используемых при обработке результатов испытаний.

Состав исходных данных для планирования испытаний зависит от закона распределения наработки до отказа; при экспоненциальном законе для планирования испытаний задают следующие параметры:

α_0 и α_1 – одностороннюю доверительную вероятность правильного определения соответственно продолжительности испытаний и числа отказов z; δ – относительную ошибку определения числа наблюдаемых отказов r; $T_{ож}$ – ожидаемое значение средней наработки до отказа партии изделий.

В некоторых случаях объем выработки задается. При нормальном распределении для планирования испытаний задают: α – доверительную вероятность для определения объема выборки; ε – абсо-

лютную ошибку оценки средней наработки до отказа; $\sigma_{ож}$ – ожидаемое значение среднеквадратического отклонения наработки до отказа партий изделий.

Испытания на надежность изделий проводятся выборочным методом, поскольку в процессе испытания расходуется ресурс ремонтируемой аппаратуры и уничтожается неремонтируемая аппаратура.

Различают усеченную и неусеченную выборку. Выборка называется неусеченной, если определяются показатели надежности всех N испытываемых объектов. При усеченной выборке количество наблюдений меньше объема выборки, например, $r < N$.

По результатам выборочных испытаний получают точечные и интервальные оценки показателей надежности всей партии изделий.

Общие положения о контрольных испытаниях

Контрольные испытания на надежность проводятся с целью контроля соответствия значений показателей надежности изделий требованиям нормативно-технической документации.

Контрольные испытания на надежность подразделяются на испытания:

- на безотказность;
- ремонтопригодность;
- сохраняемость;
- долговечность.

Испытания включают в себя следующие этапы:

- планирование испытаний;
- проведение испытаний и сбор информации о показателях надежности (количество отказов за заданное время, наработка на отказ, время восстановления и др.);
- определение показателей надежности контролеру алой партии по результатам испытаний;
- принятие решения о контролируемой партии.

При выборочных контрольных испытаниях из партии изделий выбирают любую группу изделий. По результатам испытаний этой выборки принимается решение о соответствии или несоответствии

показателей надежности предъявленным требованиям (партия изделий принимается заказчиком или бракуется).

Из-за случайности выборки изделий возможны ошибки при оценке показателей надежности всей партии по выборочным характеристикам. Ошибкой первого рода называется событие, когда годная партия изделий оценивается по результатам испытаний выборки как негодная. Ошибкой второго рода называется событие, когда негодная партия изделий оценивается по результатам испытаний выборки как годная.

Для планирования контрольных испытаний используются приемочный и браковочный уровни показателя надежности, например, приемочное значение наработки на отказ – T_o (браковочное значение $T = 1$); риск доставщика – α; риск потребителя (заказчика) – β.

Риском поставщика α называется вероятность ошибки первого рода, т.е. вероятность браковки годной партии, имеющей генеральную характеристику показателя надежности, равную приемочному уровню.

Риском потребителя β называется вероятность ошибки второго рода, т.е. вероятность приема негодной партии, имеющей генеральную характеристику показателя надежности, равную браковочному уровню.

В результате планирования испытания должны быть получены:

- оценочный норматив, с которым будет сравниваться контролируемый показатель надежности;
- объем выборки N;
- значение критерия, определяющего продолжительность испытаний и другие параметры.

Перечень параметров, определяемых при планировании, зависит от метода проведения контрольных испытаний.

Надежность управления технологической системой

Теория надежности изучает процессы возникновения отказов объектов и способы борьбы с отказами. Для удобства решения задач часто различают два вида объектов: элементы и системы. Система предназначена для самостоятельного выполнения определенной практической задачи. Элемент является составной частью сис-

темы. В принципе систему можно разбить на любое число элементов, необходимое для исследования надежности. Однако деление системы на элементы нельзя считать произвольным. Каждый элемент должен обладать способностью выполнять в системе определенные функции, и деление системы на элементы должно быть удобным для последующего использования.

Различают два состояния объектов: работоспособное и неработоспособное. Работоспособным называется состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации. Состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации, называют неработоспособным.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта, т.е. в переходе в неработоспособное состояние. Обычно неработоспособным называют состояние объекта, при котором его нельзя применять. Однако возможны задачи, в которых неработоспособным считают состояние объекта, при котором он не может продолжать выполнять свое назначение. Поэтому при оценке надежности необходимо заранее оговорить, какое состояние объекта считается неработоспособным, поскольку это зависит от назначения данного объекта. Например, если погрешность измерительного прибора больше, чем требуется для применения в данном технологическом процессе, то его считают неработоспособным, однако его можно применять в другом процессе с более низкими требованиями.

Когда объект предназначен для выполнения нескольких функций, часто находят значения показателей надежности по каждой функции. Возможен и другой путь: оценивают свойство объекта выполнять все требуемые от него функции. Отказом считается невыполнение хотя бы одной из функций независимо от того, возникла ли ситуация, в которой требуется выполнение этой функции.

Отказы можно различать по нескольким признакам.

1. По характеру устранения – окончательные (устойчивые) и перемежающиеся (то возникающие, то исчезающие) отказы. Окончательные отказы являются следствием необратимых процессов в деталях и материалах. При окончательных отказах для восстановления работоспособности объекта необходимо производить его ре-

монт (регулировку). Перемежающиеся отказы в большинстве случаев являются следствием обратимых случайных изменений режимов работы и параметров объектов. При возвращении режима работы в допустимые пределы объект сам, обычно без вмешательства человека, возвращается в работоспособное состояние. Таким образом, перемежающиеся отказы существенно отличаются от окончательных причиной возникновения, внешними проявлениями и последствиями появления. Поэтому иногда целесообразно различать два показателя надежности: для окончательных отказов и для перемежающихся.

2. По связи с другими отказами – первичные, т.е. возникающие по любым причинам, кроме действия другого отказа, и вторичные, т.е. возникающие в результате другого отказа. Например, из-за пробоя конденсатора может сгореть резистор. При вычислении показателей надежности обычно учитываются лишь первичные отказы. Отказы являются случайными событиями, которые могут быть независимыми или зависимыми. Отказы являются зависимыми, если при появлении одного из них изменяется вероятность появления второго отказа. Для независимых отказов вероятность появления одного из них не зависит от того, произошли другие отказы или нет.

3. По легкости обнаружения отказы могут быть очевидными (явными) или скрытыми (неявными).

4. Для каждого определенного типа объектов отказы можно различать по внешним проявлениям. Например, различные отказы конденсаторов можно разбить на две группы: типа «обрыв» или «замыкание».

5. По характеру возникновения можно различать отказы внезапные, состоящие в резком, практически мгновенном изменении характеристик объектов, и отказы постепенные, происходящие из-за медленного, постепенного ухудшения качества объектов. Рассмотрим более подробно характер возникновения отказов. Внезапные отказы обычно проявляются в виде механических повреждений элементов (поломок, трещин, обрывов, пробоя изоляции и т.п.), из-за чего эти отказы часто называют грубыми. Внезапные отказы получили свое название из-за того, что обычно отсутствуют видимые признаки их приближения, т.е. перед отказом обычно не удается обнаружить количественные изменения характеристик объекта. Постепенные отказы (параметрические, плавные) связаны с износом деталей, старением материалов и разрегулированием устройств. Параметры объекта могут достигнуть критических значений, при

которых его состояние считается неработоспособным. Внезапный отказ объекта также является следствием накопления необратимых изменений материалов. Внезапным отказ кажется потому, что не контролируется изменяющийся параметр, при критическом значении которого наступает отказ объекта, обычно связанный с его механическим повреждением.

Для объектов разного назначения и устройства применяются различные показатели надежности. В настоящее время можно выделить четыре группы технических объектов, различающиеся показателями и методами оценки надежности:

1) невосстанавливаемые объекты, применяемые до первого отказа (резистор, конденсатор);

2) восстанавливаемые вне процесса применения объекты (автопилот);

3) восстанавливаемые в процессе применения объекты, для которых недопустимы перерывы в работе (резервированная линия связи);

4) восстанавливаемые в процессе применения объекты, для которых допустимы кратковременные перерывы в работе (робот, станок).

Показатели надежности невосстанавливаемых объектов

Для оценки надежности невосстанавливаемых объектов используют вероятностные характеристики случайной величины – наработки T объекта от начала его эксплуатации до первого отказа. Под наработкой понимают продолжительность или объем работы объекта, измеряемые в часах, циклах или других единицах. Когда наработку на отказ выражают в единицах времени, иногда используют термин «время безотказной работы», или, что то же самое, по сути, «время до появления отказа».

Полной характеристикой любой случайной величины является ее закон распределения, т.е. соотношение между возможными значениями случайной величины и соответствующими этим значениям вероятностям. Распределение наработки до отказа может быть описано с помощью различных показателей надежности невосстанавливаемых объектов: функция надежности $p(t)$, плотность распределения наработки до отказа $f(t)$, интенсивность отказов $l(t)$.

Функцией надежности называют функцию, выражающую вероятность того, что T – случайная наработка до отказа – будет не менее заданной наработки (0, t), отсчитываемой от начала эксплуатации, т.е. $p(t) = P\{T \geq t\}$. Перечислим некоторые очевидные свойства $p(t)$:

1) $p(0) = 1$, т.е. можно рассматривать безотказную работу лишь тех объектов, которые были работоспособны в момент начала работы;

2) $p(t)$ является монотонно убывающей функцией заданной наработки t;

3) $p(t) \to 0$ при $t \to +\infty$, т.е. любой объект со временем откажет. Наряду с $p(t)$ используется и функция ненадежности $q(t) = 1 - p(t) = P\{T < t\}$. Она характеризует вероятность отказа объекта на интервале (0, t).

Показатели надежности объектов, восстанавливаемых вне процесса применения

Такие объекты могут быть восстановлены лишь после выполнения задания (оборудование самолетов и т.д.). Показатели надежности этих объектов вычисляются по наработке. Суммарная наработка до возникновения n-го отказа $T_{sn} = T_1 + T_2 + ... + T_n$, где T_i – наработка между $(i - 1)$-м и i-м отказами.

Возможны два пути оценки надежности объектов, восстанавливаемых вне процесса применения:

1) вычисление условных характеристик потока отказов;

2) вычисление условных распределений наработки между отказами.

Первый путь в настоящее время является общепринятым. Рассматриваются потоки случайных событий, каждое из которых состоит в появлении отказа объекта. Поток отказов состоит в появлении отказа объекта. Поток отказов можно охарактеризовать «ведущей функцией» потока $Q(t)$ – математическим ожиданием числа отказов на интервале (0, t). Однако чаще всего в качестве показателя надежности используют параметр потока отказов $w(t)$, который характеризует среднее число отказов, ожидаемых в малом интервале наработки, определяемое для рассматриваемого момента t суммарной наработкой и описываемое выражением

$$w(t) = a(t) = \lim_{dt \to 0} \frac{P_1(t, t+dt)}{dt} + o(dt). \qquad (70)$$

Здесь $P_1(t, t+dt)$ – вероятность появления одного отказа на интервале $(t, t+dt)$; $o(dt)$ – бесконечно малая величина более высокого порядка малости, чем dt (вероятность появления двух и более отказов на интервале $(t, t+dt)$).

Показатели надежности объектов, восстанавливаемых в процессе применения

Показатели надежности объектов, восстанавливаемых в процессе применения, вычисляются лишь в календарном времени. Такие объекты можно разделить на две группы. К первой группе относятся объекты, для которых в течение заданного времени работы допускаются отказы и вызванные ими кратковременные перерывы в работе. Для объектов этой группы большое значение имеет свойство готовности – способность находиться в процессе эксплуатации значительную долю времени в работоспособном состоянии. Ко второй группе относятся объекты, отказы которых в течение заданного времени недопустимы. Если в этих объектах (системах) имеются избыточные элементы, то при отказах некоторых из них объект остается работоспособным и можно проводить ремонт отказавших элементов во время выполнения задачи. Один и тот же объект может быть отнесен к разным группам в зависимости от режима его применения.

Для первой группы объектов в процессе эксплуатации чередуются случайные периоды времени безотказной работы и времени восстановления (ремонта). Тогда случайное время между очередными восстановлениями T_{oi} равно $T_{oi} = T_{pi} + T_{вi}$ [70]. Если случайные величины T_{pi} и $T_{вi}$ независимы, то плотность распределения их суммы T_{oi} по известному из теории вероятностей правилу о композиции распределений равна

$$f_o(t) = \int_0^t f(x) g(t-x) dx, \qquad (71)$$

где $f(t)$ – плотность распределения времени безотказной работы; $g(t)$ – плотность распределения времени восстановления объекта.

Для объектов второй группы могут в качестве показателей надежности использоваться также параметр потока отказов, средняя наработка на отказ и другие характеристики.

Все рассмотренные показатели надежности объектов можно разделить на три группы:

1) интервальные, относящиеся к заданному интервалу наработки или времени (t_1, t_2);

2) мгновенные, соответствующие заданному значению времени или наработки t;

3) числовые, не связанные с расположением заданного интервала или момента времени (наработки).

Оценка показателей надежности объектов по экспериментальным данным

Экспериментальные данные о надежности технических объектов могут быть получены в результате наблюдений за их работой либо в условиях реальной эксплуатации, либо при специальных испытаниях на безотказную работу. Данные испытаний обычно не могут полностью заменить эксплуатационные данные. Реальная же эксплуатация представляет собой недостижимый по своим масштабам в лабораторных условиях эксперимент. Однако и при реальной эксплуатации далеко не всегда удается получить нужную информацию.

Данные реальной эксплуатации часто соответствуют морально стареющим устройствам. Конструкция и технология изготовления современных технических объектов меняются столь быстро, что нередки случаи, когда данные об эксплуатации объектов, выпущенных несколько лет назад, имеют лишь историческое значение. Вместе с тем основной целью любых исследований в области надежности является повышение надежности будущих объектов.

Данные реальной эксплуатации обычно являются неполными. Это объясняется рядом причин: организационными трудностями сбора и обработки сведений, трудоемкостью применения переносной контрольно-измерительной аппаратуры, недостаточной чувствительностью и точностью этой аппаратуры и не всегда достаточной квалификацией работников. Из-за ограниченности объема статистических данных во многих случаях трудно получить досто-

верные характеристики надежности для различных условий применения объектов.

Иногда трудно осуществлять наблюдение за работой некоторых объектов при их реальной эксплуатации.

Перечисленные причины определяют необходимость широкого применения испытаний изделий на безотказную работу и моделирования процесса эксплуатации. Испытания на безотказную работу почти всегда связаны с физическим моделированием условий эксплуатации. При проведении этих испытаний обычно удается преодолеть большинство перечисленных трудностей. Однако эксперимент продолжается очень долго, обычное время наработки на отказ исчисляется десятками тысяч часов (в случае непрерывной работы – годами). Для проведения эксперимента необходимо значительное количество специального оборудования. Как правило, подобный эксперимент стоит очень дорого: часто при испытаниях приходится расходовать значительное количество специального оборудования. Испытаниям подвергаются лишь серийно выпускаемые изделия, тогда как часто желательно иметь хотя бы некоторую информацию о проектируемых изделиях. Поэтому нельзя ограничиться лишь испытаниями на безотказную работу. Возникает вопрос о применении и всемерном развитии моделирования процесса эксплуатации изделий и разработке методов ускоренных испытаний.

Этот путь лабораторных исследований дает возможность проводить эксперимент в течение очень короткого времени, многократно повторять и видоизменять его. Кроме того, можно в какой-то степени исследовать поведение будущих проектируемых объектов.

Испытания на безотказную работу бывают определительными или контрольными. При определительных испытаниях находят действительные значения показателей надежности технических объектов. Контрольные испытания должны либо подтвердить, что испытуемые объекты обладают надежностью не ниже требуемой (при этом технические объекты принимаются), либо опровергнуть это утверждение (при этом объекты бракуются). Иначе говоря, определительные испытания проводят с целью сбора информации о надежности объектов, а контрольные испытания – для обоснования решения о качестве продукции.

Испытаниям на безотказную работу обычно подвергается сравнительно небольшое число экземпляров объектов. Поэтому существует проблема статистической оценки свойств объектов по

результатам испытаний ограниченного числа экземпляров. Имеются два варианта постановки этой задачи, обычно связанные с различным назначением испытаний:

1) может быть поставлен вопрос, соответствуют ли значения показателей надежности заданным требованиям. Этот вопрос обычно возникает при контрольных и приемо-сдаточных испытаниях. При такой постановке задачи решение обычно ищется путем проверки статистических гипотез;

2) можно ставить вопрос об определении численных значений показателей надежности испытуемых объектов. Такие вопросы возникают при испытаниях блоков, узлов, макетов аппаратуры в ходе ее конструирования и применения. В данном случае обычно применяются методы оценки параметров распределения наработки на отказ.

Общие методы решения подобных задач в математической статистике разрабатываются уже давно. Применение этих методов для оценки результатов испытаний на безотказную работу обычно не вызывает принципиальных затруднений.

Испытания на безотказную работу различаются по значению и характеру внешних воздействий на испытываемые изделия.

До проведения определительных и контрольных испытаний проводятся аппроксимация имеющихся экспериментальных данных каким-либо теоретическим распределением и проверка статистической гипотезы о том, что принятое теоретическое распределение не противоречит экспериментальному.

Для проведения испытаний составляется план, в котором указываются: количество объектов, которое ставится на испытания; порядок замены отказавших объектов, продолжительность испытаний.

Результаты испытаний обычно представляют в виде упорядоченной последовательности (вариационного ряда) чисел, которые являются значениями наработки до отказа объектов.

Параметрическая надежность технических объектов

Если отказы происходят из-за плавных изменений свойств объектов, то эти отказы называют параметрическими или постепенными. Надежность в отношении параметрических отказов часто называют параметрической надежностью. Для оценки надежности объектов по данным о приближении к отказам необходимо составить модели процессов развития отказов. Могут быть составлены

модели типа нагрузка-прочность и параметр-поле допуска. В обоих случаях объект является работоспособным, пока изменяющаяся в процессе эксплуатации величина не достигнет границы рабочей области. Между моделями этих типов имеются лишь методологические различия.

Поскольку цель исследования надежности состоит в нахождении распределения наработки до отказа, в моделях процессов развития отказов хотя бы один из факторов должен рассматриваться как случайный процесс. Особенности случайных процессов старения, изнашивания, разрегулирования заключаются в том, что они вызывают грубые отказы. Такой отказ является следствием накопления необратимых изменений материалов. Иначе говоря, возникновение этого отказа является следствием монотонного случайного процесса изменения какого-то параметра элемента. Отличие от постепенного отказа состоит в том, что не контролируется изменяющийся параметр, при достижении которым критического значения (границы) наступает внезапный отказ элемента, обычно связанный с его механическим повреждением.

Таким образом, любой отказ объекта связан со случайным процессом (в общем случае векторным) изменения определяющего параметра и происходит при достижении этим параметром критических значений.

При эксплуатации или хранении удается лишь 1–2 раза измерить значения определяющего параметра одинаковых элементов. Поэтому часто оказывается, что можно лишь предполагать по данным ограниченного числа вертикальных сечений, какой в действительности случайный процесс изменения параметра. Таким образом, обычно в ходе исследования приходится интерполировать и экстраполировать значения определяющего параметра элемента. Для этого необходимо иметь гипотезу о характерном виде кривых износа. Естественно предположить, что в основной период работы скорость изменения параметра каждого элемента примерно постоянна. Для наугад взятого элемента скорость изнашивания случайна – для каждого элемента – своя.

По изложенным причинам для описания процессов изнашивания во многих случаях целесообразно применять линейные случайные процессы, все реализации которых являются прямыми линиями. Эти процессы близки к встречающимся в действительности, очень просто описывают основные особенности процессов изменения параметра, требуют минимального количества эксперимен-

тальных данных для вычисления характеристик случайного процесса и дают возможность наиболее просто исследовать надежность элементов при изменении их свойств.

Связь показателей надежности и качества функционирования технологических систем

Под качеством функционирования технологических систем обычно понимают степень приспособленности системы к выполнению ею своего основного назначения. Соответствующий количественный показатель называют показателем или критерием качества функционирования. Вид показателя качества функционирования и его значение во многом определяются видом решаемой задачи, зависят от цели, которую при этом стремятся достигнуть.

Существуют три группы показателей функционирования ТС: внешние, внутренние, общие. Внешние показатели обычно интересуют потребителей системы: количество, качество и стоимость продукции и обслуживания. Внутренние показатели (например, с позиции персонала и администрации), которые необходимо учитывать, – удельные (единичные) затраты (например, в поисковой автоматизированной информационной системе стоимость одной найденной релевантной ссылки). При рассмотрении общих показателей качества функционирования ТС можно выделить три вида эффекта применения ТС: социальный, научно-технический и экономический. Эти виды взаимосвязаны. Они приведены в табл. 35.

Таблица 35

Показатели качества функционирования системы

Внешние	Внутренние	Общие
Показатели качества продукции Показатели качества обслуживания потребителей	Удельные экономические показатели	Экономические показатели Показатели социального эффекта Показатели научно-технического эффекта

Для определения значений показателей качества функционирования рассматривают результаты применения системы по назна-

чению. При этом приходится учитывать воздействие на систему случайных факторов. Показатели качества обычно являются характеристиками случайных явлений: случайных событий, величин, процессов. Наиболее часто показателями качества функционирования служат математические ожидания случайных величин.

Методы оценки надежности технологических систем

Сведения о структуре и функциональных связях элементов проектируемых систем задаются в виде схемы, на которой с помощью условных обозначений изображены элементы и функциональные связи между ними. Качество такой системы характеризует предельная (располагаемая) производительность $E(t)$, равная максимальному числу единиц «рабочего тела», которые могут транспортироваться в единицу времени. Производительность системы определяется на выходных элементах. При нескольких выходных элементах может измеряться общая суммарная производительность системы или производительность системы по отдельным выходам. При безотказной работе всех элементов системы располагаемая производительность равна номинальной. При отказах отдельных элементов производительность может уменьшаться; когда она станет меньше критической, наступает отказ системы. Отказавшие элементы восстанавливаются и через некоторое время вступают в строй, работоспособность системы восстанавливается.

Связь между качеством функционирования и надежностью системы может быть установлена двумя путями:

1) оценивают потери качества функционирования из-за недостаточной надежности системы или ее элементов. При этом находят значения коэффициента функционирования, соответствующие потерям качества функционирования системы из-за ненадежности;

2) принимают в качестве определения границы работоспособного состояния системы установленный заранее процесс потери качества функционирования. При этом выход реализации случайного процесса за границу допуска соответствует отказу системы, а пересечение границы допуска в обратном направлении – восстановлению работоспособности. По значениям времени появления отказов и восстановлений системы можно найти общепринятые показатели надежности.

Таким образом, для перехода от рассмотрения качества функционирования к рассмотрению надежности системы необходимо

ввести определения работоспособного и неработоспособного состояний системы. При переходе от рассмотрения качества функционирования системы к рассмотрению ее надежности полезно строить временные эпюры, на которых указаны периоды нахождения системы в работоспособном и неработоспособном состояниях.

Рассмотрим более подробно вопрос о моделях возникновения отказов ТС. Возможны несколько групп моделей возникновения отказов технологических систем, которые условно назовем отказами по качеству, по располагаемой производительности, по времени достижения заданного выходного эффекта.

В первой группе моделей состояние ТС характеризуется значениями определяющих параметров продукции. Отказом считается выход значений определяющего параметра выпускаемой продукции за границу допуска. При этом оценить надежность ТС станет легче при принятии дополнительных допущений.

Вторая группа моделей возникновения отказов (и восстановлений) ТС рассматривает изменения производительности этих систем. Например, в модели может быть принято, что при появлении отказа система прекращает выпуск продукции и подвергается аварийному ремонту, в результате которого восстанавливается номинальная производительность.

Методы повышения надежности объектов и технологических систем

Факторы, влияющие на надежность объектов при их эксплуатации, могут быть субъективными и объективными. Субъективные воздействия происходят из-за неправильных действий людей. Любое, даже полностью автоматизированное устройство требует периодического обслуживания, т.е. подвергается воздействию людей. При этом возможны приводящие к отказам объектов неправильные действия людей, обусловленные недостатком знаний, опыта, плохой организацией работы. Например, к отказу технического объекта могут привести неправильное регулирование, нарушение правил включения и выключения, нарушения порядка, методики и объема работ по техническому обслуживанию.

Объективные воздействия можно разделить на две группы:

1) общие воздействия, которым подвергаются в той или иной мере все объекты данного типа;

2) частные воздействия, которым могут подвергаться отдельные конкретные образцы.

Как общие, так и частные воздействия могут быть постоянными или переменными. Объективные можно разделить на рабочие, климатические, биологические.

Надежность всех объектов сильно зависит от температурного режима их работы. Особенно вредно сочетание тяжелого температурного режима с ударами и вибрациями.

Можно выделить четыре группы мероприятий по повышению надежности объектов при их проектировании: системные, структурные (схемные), конструктивные и эксплуатационные. К системным относятся организационно-экономические мероприятия по стимулированию повышения надежности (премирование персонала за безотказную работу) и технические мероприятия, такие как, например, применение стойких к температурным изменениям элементов. Очень велико значение организационно-экономических мероприятий по стимулированию повышения надежности. Например, если в стоимость изделия включаются затраты на гарантийный ремонт, то при этом изготовитель учитывает, что при повышении надежности объектов уменьшаются затраты на гарантийный ремонт. Таким образом стимулируются точные оценки надежности и ее повышение. В качестве второго примера организационно-экономического мероприятия по стимулированию повышения надежности можно привести подход к обеспечению надежности заказываемых объектов путем планирования расходов на весь срок службы.

Технические мероприятия по формированию показателей надежности проектируемых изделий необходимы при любой системе взаимоотношений заказчика и разработчика.

Структурные (схемные) методы объединяют мероприятия по повышению надежности объектов путем совершенствования принципов их построения. Эти методы отличаются большим разнообразием и интенсивно развиваются. В качестве примера можно привести различные варианты построения ЭВМ, нечувствительных к появлению отказов. При создании таких ЭВМ приходится значительно усложнять их структуру, вводя избыточные аппаратные и программные средства и все более сложные схемные решения. Можно выделить две группы таких ЭВМ, различающихся распределением функций между аппаратными и программными средствами. Для ЭВМ обоих типов характерны мультипроцессорная архитектура и оповещение о критических ситуациях. Различие состоит в способах

локализации неисправных элементов и восстановления функционирования системы. В ЭВМ, использующих в основном аппаратные средства защиты от отказов, они обнаруживаются схемами голосования в трехкратно резервированной шине. Местонахождение отказавших модулей определяется также аппаратными средствами. Восстановление контролируется специальной управляющей программой. При этом назначение всех модулей мультипроцессора может измениться в ходе эксплуатации. При необходимости производится реконфигурация системы, отказавшие модули выключаются.

В ЭВМ, использующих в основном программные средства защиты от отказов, их анализ и реконфигурация системы производятся целиком программными средствами. Ошибки обнаруживаются при сравнении результатов избыточных вычислений. Каждая задача решается независимо тремя или пятью процессорными модулями, и результаты сравниваются. Отказавшие модули находятся с помощью программных таблиц, хранящих информацию об отказавших модулях и шинах. После анализа возможных комбинаций ошибок главная управляющая программа производит реконфигурацию системы. Для успешного применения структурных методов повышения надежности автоматизированных производственных систем необходима дальнейшая разработка ряда проблем, методов рационального распределения функций между аппаратными и программными средствами при обнаружении отказов элементов и восстановлении системы, способов классификации отказов технических средств и ошибок программ и защиты от них, методов и средств объединения отдельных частей системы управления в единое целое.

К конструктивным относятся мероприятия по созданию или подбору элементов, созданию благоприятных режимов работы, принятию мер по облегчению ремонта и т.д. Обычно оказываются более надежными те элементы, которые не имеют перемещающихся деталей, накаливаемых нитей и тонких обмоток.

Надежность элемента зависит от его конструкции, способа изготовления и условий применения. При облегчении электрических, тепловых и вибрационных режимов работы элементов интенсивности их отказов значительно уменьшаются. При конструировании транспортируемой электронной аппаратуры можно обеспечить защиту от ударов и вибраций. Правильная амортизация аппаратуры часто является основным фактором, определяющим ее надежность.

При оценке условий работы элементов особое внимание нужно обращать на переходные процессы, возникающие при включении и выключении, а также при других изменениях режима работы аппаратуры. Перегрузки, испытываемые элементом при переходных процессах, могут быть одной из причин пониженной надежности аппаратуры.

При проектировании должно учитываться изменение параметров материалов и деталей во времени (старение). Учет старения необходим и для кратковременно работающих объектов, так как они могут применяться после долгого периода складского хранения. При этом целесообразно так подобрать минимальные значения параметров элементов, чтобы обеспечить максимальную параметрическую надежность системы.

Время устранения отказа можно уменьшить путем построения систем по блочно-узловому способу. Вся система разбивается на отдельные функционально законченные блоки, которые в электронных системах связываются кинематически. Блоки в свою очередь разбиваются на функционально законченные узлы, выполняемые в виде легкосъемных конструкций. При таком построении объектов восстановление состоит в замене вышедших из строя блоков или узлов, что значительно ускоряет процесс ввода объектов в строй. Осуществление блочно-узловых конструкций тесно связано с унификацией элементов и систем, которая производится на основе отбора наиболее надежных вариантов. При этом не только повышается надежность объектов, но и снижается их стоимость и упрощается изготовление.

Для облегчения ремонта отделенных от основной системы неработоспособных блоков также крайне необходима унификация блоков, деталей, напряжений и частот питания и т.д. Унификация облегчает снабжение запасными частями и снижает стоимость эксплуатации, а также затраты на средние или капитальные ремонты.

Планирование эксплуатационных мероприятий на стадии проектирования объектов состоит в разработке системы эксплуатационного обеспечения. Проектирование объектов должно осуществляться в соответствии с номенклатурой работ по техническому обслуживанию. Например, для планирования периодического регулирования определяющих параметров устройств необходимо предусмотреть возможность контроля и прогнозирования значений этих параметров.

Для повышения надежности при изготовлении необходимо проводить мероприятия по обеспечению однородности выпускаемой продукции. Все эти мероприятия можно объединить в четыре группы:

1) совершенствование технологии производства;
2) автоматизация производства;
3) технологические (тренировочные) прогоны;
4) статистическое регулирование качества продукции.

5.8. Защита радиоэлектронных средств от воздействия климатических факторов

Существуют разнообразные способы защиты РЭС от воздействия внешней среды, в частности, климатических воздействий.

Большинство изоляционных материалов обладает низкой влагостойкостью вследствие высокой поверхностной смачиваемости и пористости. Диэлектрики способны не только к поверхностной адсорбции, но и по законам диффузии поглощают влагу всем объемом.

Требования к РЭС различны. Так, элементы, предназначенные для работы на высоких частотах, должны обладать постоянной емкостью. Одним из основных требований является сохранение в эксплуатационных условиях высокого сопротивления изоляции и электрической прочности.

К числу наиболее распространенных способов защиты относится пропитка воскообразными веществами, а также лаками на растворителях, естественными и искусственными смолами и всевозможными компаундами.

Поверхность деталей можно защитить от влияния влаги слоем покровных лаков или компаундов, что повышает также поверхностное сопротивление деталей. Однако это только замедляет процесс поглощения влаги.

Наиболее надежным способом является герметизация с помощью влаго- и воздухонепроницаемых оболочек – герметических кожухов.

Пропитка деталей РЭС

Пропитывают в основном каркасы катушек, монтажные платы, планки и колодки, намоточные изделия и т.д.

Примерная схема ТП состоит из следующих основных операций:

1) предварительная сушка изделия;

2) пропитка – заполнение пропиточным материалом мест, ранее занятых влагой и воздухом;

3) сушка пропитанных изделий – для удаления растворителей из пропиточного состава;

4) лакировка или обволакивание – для предохранения поверхности изделия от проникновения влаги, кислот, щелочей, масла, а также от скапливания на изделиях пыли и грязи;

5) сушка после лакировки – для удаления растворителей и затвердевания обволакивающего состава.

Предварительная сушка проводится либо при повышенной температуре от 100 до 130 °С, либо в вакууме – с более низкой температурой.

О влажности изоляции в процессе сушки судят по изменению сопротивления изоляции при установившейся температуре нагрева.

Время, после которого при определенном режиме сушки устанавливается практически постоянное сопротивление, увеличивают на 10–20 % и принимают как оптимальное время.

В настоящее время в отечественной промышленности находят все более широкое применение термоизлучатели, использующие газообразное топливо или электроэнергию.

Терморадиационные установки во много раз производительнее конвекционных, но применяются в основном для неглубокой сушки. Сушка в индукционных устройствах осуществляется нагревом стальных стенок устройства вихревыми токами. При этом время сушки уменьшается в 3–4 раза.

Различают:

- пропитку при атмосферном давлении;
- пропитку под вакуумом;
- комбинированную (циклическую) пропитку.

Пропитка при атмосферном давлении: изделие погружают на 10–25 мин в ванну с расплавленным пропиточным составом, при этом на поверхности изделия создается небольшой покровный слой, закрывающий поры изделия. Данный способ не обеспечивает глубокой пропитки и полного удаления воздуха и влаги из пор пропитываемого изделия.

При вакуумной пропитке откачивают из пор не только влагу, но и воздух. При этом повышаются изоляционные качества, увеличиваются теплопроводность и влагоустойчивость изделия. Пропитка проводится в специальных установках – автоклавах.

В некоторых случаях применяется пропитка под давлением: периодически (через 5–10 мин) создается повышенное до 3–5 атм. давление, затем – обычное. Это способствует лучшему проникновению пропиточного состава в капилляры материала.

Комбинированная (циклическая) пропитка – наилучшая – сочетание вакуумной пропитки с пропиткой под давлением.

Скорость испарения влаги с поверхности записывается так:

$$\frac{dM}{d\tau} = b\Delta cF. \qquad \Delta c = P_{\text{м}} - P_{\text{о}},$$

где $\frac{dM}{d\tau}$ – скорость испарения; b – коэффициент испарения, учитывающий аэродинамические условия испарения и физические свойства жидкости; F – площадь поверхности; $P_{\text{м}}$ – давление водяных паров над поверхностью материала; $P_{\text{о}}$ – давление водяных паров в окружающей среда.

Влага перемещается в материале со скоростью, пропорциональной градиенту влажности ΔU:

$$i_U = K\gamma\Delta U,$$

где i_U – плотность потока влаги; K – коэффициент влагопроводности коллоидного капиллярно-пористого тела; γ – удельный вес вещества; U – влажность материала в любой точке.

Пропитка – процесс герметизации гигроскопичных изделий путем заполнения пор, капилляров, трещин, воздушных зазоров диэлектрическими материалами, которые после обработки могут оставаться жидкими, застывать или отвердевать. Она обеспечивает повышение влагостойкости (вследствие заполнения пор и т.д.); электрической прочности (устраняются воздушные промежутки, которые могут ионизироваться и приводить к пробою даже в герметичных условиях); механической прочности (вследствие склеивания витков обмоток и т.д.); допустимой $t_{\text{раб}}$ и улучшения теплоотвода (из-за вытеснения воздуха при пропитке обмоток улучшается теплоотвод от внутренних слоев обмотки).

Чтобы пропиточный материал мог проникнуть в поры, он должен быть низкомолекулярным (например: фенолоформальдегидные и глифталевые смолы, имеющие диаметр молекулы около 10^{-9} м), так как в противном случае крупные молекулы будут отфильтровываться на поверхности и внутрь проникнет лишь растворитель. Другим требованием к пропитывающему составу является малая вязкость, достичь которой можно применением растворителя (что не всегда желательно, так как растворитель при пропитке различного вида обмоток может остаться в глубине обмотки, закупориться там, разрушить эмаль, что в конечном итоге приведет к появлению короткозамкнутых витков). Полиэфирные компаунды типа КП имеют малую вязкость и хорошую пропитывающую способность без применения растворителей, но $t_{\text{полим}}$ полимеризации 150 °С не всегда является допустимой. Пропиточный состав должен обладать хорошей адгезией к материалу изделия, иначе со временем образуются зазоры, куда проникает влага. При пропитке обмоток, выполненных тонким проводом (диаметром 0,07 мм и меньше), важно, чтобы заполимеризованный лак был эластичным, для чего в его состав вводят пластификаторы.

Обволакивание изделий пленками из органических диэлектриков. Процесс обволакивания создает покровные оболочки на поверхности изделий, предназначенных для кратковременной работы в условиях влажной среды.

Обволакивание не обеспечивает (при $t > 100$ ч) надежной влагозащиты, так как между металлическими выводами и защитной пленкой неизбежно появляются микроскопические каналы и зазоры за счет разности ТКЛР и усадки.

К материалам, применяемым для создания защитных оболочек, предъявляют требования:

1) высокая адгезия к материалам покрываемого изделия;
2) достаточная механическая прочность;
3) малая влагопроницаемость;
4) высокие электроизоляционные свойства.

Процесс нанесения покровного слоя осуществляется несколькими способами: окунанием, прессованием и прессовкой.

Наиболее простой способ – окунание. В процессе прессования изделие, установленное и зафиксированное в пресс-форме, обволакивается расплавленным термопластичным материалом под давлением.

Заливка узлов и блоков РЭС

Заливкой называется процесс заполнения лаками, смолами или компаундами свободного пространства между деталями, отдельными изделиями или узлами и стенками кожуха.

Заливка, помимо защиты от климатических воздействий, повышает механическую прочность и стойкость против вибрационных нагрузок за счет некоторой эластичности заливочного материала.

При значительной величине заливаемого пространства в результате циклических колебаний температуры возникают напряжения в материале, вызывающие микротрещины. Для повышения стойкости компаундов к тепловым ударам в их состав вводят пластификаторы – полиэфиры, а для повышения механических свойств – наполнители (тальк, двуокись титана и др.).

ТП заливки изделий эпоксидными смолами и компаундами на их основе имеют свои особенности. Заливка производится в специальных формах (чаще всего стальных). В зависимости от конфигурации, размеров – это либо открытые, закрытые, одноместные либо многоместные формы – обладают высокой точностью обработки поверхности.

Процесс заливки состоит из следующих операций:

1) подготовка формы;
2) фиксация изделия в форме;
3) сушка изделия;
4) заливка;
5) полимеризация компаунда;
6) контроль.

Герметизация РЭС

Наиболее элективный способ защиты и повышения надежности – помещение в специальные кожухи и оболочки из металлов, керамики или стекла. Однако это дорогие оболочки. Порой применяют более дешевые и простые корпуса из органических материалов.

Электрические высокочастотные и высоковольтные выводы осуществляют через проходные изоляторы. Низкочастотные цепи

соединяют с помощью герметизированных штепсельных разъемов (ГШР).

Герметизация осуществляется пайкой швов, электроконтактной или дуговой сваркой, холодной сваркой, закаткой, уплотняющими прокладками из вакуумно-плотной резины.

Контролируют качество герметизации погружением в мыльную воду, подогретую до 70–80 °С, при этом создают разрежение до 40–50 мм рт. ст. Это обеспечивает появление пузырьков воздуха, выходящего из неплотно закрытой конструкции. Либо герметизированное изделие, заполненное маслом для улучшения теплоотдачи, проверяют в вакууме с разряжением 1–3 мм рт. ст. При этом появляются масляные пятна.

Герметизация отдельных деталей и узлов обеспечивает их замену без нарушения герметизации остальных частей, но ведет к увеличению веса и стоимости, дешевле и проще – герметизация всего блока в одном кожухе, но это затрудняет ремонт.

Влагозащита печатных узлов (ПУ)

К сожалению, радиоэлектронная аппаратура не наделена возможностями саморегулирующейся системы, позволяющими ей приспособиться к изменениям температуры и влажности воздуха в широких пределах. Повышение влажности воздуха, а в предельных случаях и конденсация влаги, приводят к ухудшению диэлектрических свойств изоляционных материалов и в первую очередь – оснований печатных плат (ПП). Доля отказов РЭС под воздействием влаги составляет 6–21 и 19–42 % соответственно при испытаниях и эксплуатации. Поэтому при разработке аппаратуры приходится предусматривать специальные меры по ее защите, позволяющие устранить или снизить вредное влияние внешних факторов. Полная изоляция РЭС от любых внешних воздействий или, наоборот, ее абсолютная открытость при постоянной продувке инертным газом или осушенным воздухом – лишь крайние случаи из всего многообразия используемых методов. Здесь же речь пойдет лишь о методах, основанных на дополнительной защите печатных узлов (ПУ) с использованием достижений химии, преимущественно химии полимеров.

Разработкой различных компаундов для герметизации узлов и блоков РЭС занимается целое направление прикладной полимерной химии. Чаще всего эти компаунды представляют собой не содержащие растворителей наполненные эпоксидные или эпоксидно-

акрилатные композиции, которыми заливаются небольшие по размерам ПУ. Отверждение таких компаундов в большом объеме сопровождается значительной усадкой и высокими остаточными напряжениями, приводящими к разрыву проводников. Отработка рецептуры и режимов их отверждения для каждой реальной конструкции часто индивидуальна и порой даже близка к шаманству. Существенный недостаток метода – неремонтопригодность изделий.

У многих специалистов слово «влагозащита» ассоциируется с лаковым покрытием. Нанесение дополнительного полимерного покрытия на ПУ – один из наиболее распространенных методов влагозащиты. Это более универсальный и, что немаловажно, более экономичный метод по сравнению с заливкой изделий полимерными компаундами. Традиционно для нанесения покрытия используют лаки, а формирование полимерной пленки на поверхности ПУ происходит чаще всего в результате одновременно протекающих процессов испарения растворителя и реакции поликонденсации связующего. Сравнительные результаты испытаний на влагостойкость ПП без покрытия и с лаковым покрытием показывают, что скорость изменения (уменьшения) сопротивления изоляции в ПП с лаковым покрытием значительно меньше. В ПП с лаковым покрытием несколько выше и конечное значение сопротивления изоляции, хотя при увеличении времени испытаний, вероятно, эта разница исчезнет. Полимерное покрытие работает как дополнительный диффузионный барьер на пути влаги к поверхности ПП, а эффективность этого барьера будет тем выше, чем ниже его диффузионная проницаемость. Как известно, влагопроницаемость полимеров изменяется в довольно широких пределах. Диапазон изменения коэффициента их влагопроницаемости составляет в зависимости от химической природы полимеров $(0{,}01 – 20)\cdot 10 – 10$ г/см·ч·Па. Поскольку не из всех полимеров можно сформировать влагозащитные покрытия, удовлетворяющие другим многочисленным специфическим требованиям, реально этот диапазон значительно уже. Поэтому требовать от разработчиков создания абсолютно влагонепроницаемых полимерных покрытий невозможно. Следует отметить, что кроме функции диффузионного барьера, полимерное покрытие выполняет также и не менее важную функцию защиты поверхности ПП от загрязнений и/или случайных замыканий проводников.

Наибольшее распространение для влагозащиты специальной техники получил эпоксидно-уретановый лак УР-231. В состоянии

поставки – это двухкомпонентная система, состоящая из раствора алкидно-эпоксидной смолы Э-30, изготовленной из смеси тунгового и льняного масел, и отвердителя (70 %-го раствора уретана ДГУ в циклогексаноне). Массовое практическое использование лака УР-231 уже само говорит о том, что по совокупности свойств он превосходит другие лаки аналогичного назначения, предлагаемые отечественными производителями. «Бочку меда» портят лишь жалобы производственников на его «капризность», выражающуюся в нестабильности свойств получаемых из него покрытий. Проанализировав химический состав лака и реальные условия его применения, можно предположить несколько возможных причин этого явления.

Проблемы возникают как у производителя, так и у потребителя.

Использование в рецептуре полуфабриката лака экзотического тунгового масла в силу объективных и субъективных причин постоянно провоцирует предприятие-изготовителя на уменьшение количества этого компонента, а в идеале – на отказ от него. Технические характеристики лака, изготовленного только на основе льняного масла, значительно хуже. Кроме того, известно, что получить продукт со стабильными свойствами на основе исходных материалов растительного происхождения, отличающихся нестабильным химическим составом, тоже непросто. У потребителя же проблемы могут возникнуть из-за другой составляющей – уретана ДГУ. Это связано с ограниченным сроком хранения и особыми условиями хранения лака, обусловленными высокой чувствительностью уретана ДГУ к влаге воздуха и повышенной температуре.

Особо следует остановиться на использовании влагозащитных покрытий на кремнийорганической основе. Казалось бы, использование эффекта гидрофобности в таких покрытиях позволит совершить качественный скачок в разработке высокоэффективных влагозащитных покрытий. Однако в нормативно-технической документации кремнийорганические покрытия на основе жидкости 136-41 (ранее ГКЖ-94) рекомендованы для применения лишь в легких и средних условиях эксплуатации. Видимо, это объясняется низкой гидролитической устойчивостью полисилоксановых полимеров, а также сравнительно большим коэффициентом их влагопроницаемости. Во всяком случае, резервы для развития работ в этом направлении далеко не исчерпаны. Об этом, в частности, свидетельствует рекламируемое ЦКБ РМ силоксановое покрытие «универсал»,

предназначенное для различных целей и в том числе для нанесения влагозащитных покрытий на ПП. В отличие от жидкости 136-41, это однокомпонентная система (раствор полимера в органическом растворителе). Удельное объемное сопротивление этого покрытия ($1 \cdot 1015$ Ом·см) внушает оптимизм.

На эффекте гидрофобности основан также принцип действия новых материалов типа «эпилам». Эпиламирующие составы содержат раствор фторсодержащих поверхностно-активных веществ в специально подобранных растворителях. При обработке ПУ фторсодержащее поверхностно-активное вещество адсорбируется поверхностью и образует на ней очень тонкую пленку. После закрепления на поверхности пленка обладает высокими гидрофобизирующими свойствами, а также высокой химической и термической стабильностью. ПП с такими покрытиями при испытаниях на влагостойкость демонстрируют существенное превышение нормы, указанной в ГОСТ 237–52 «Платы печатные. ОТУ».

Для получения влагозащитного полимерного покрытия вовсе не обязательно использовать лакокрасочные материалы. Так, предлагается метод вакуумной пиролитической полимеризации. Первые сообщения об использовании формируемых этим методом полипараксилиленовых (париленовых) покрытий относятся к восьмидесятым годам. За рубежом их наносили на корпуса часов, использовали в военной и космической технике. Привлекательность этого метода обусловлена возможностью получения покрытия одинаковой толщины (от единиц ангстрем до десятков микрометров) по всей поверхности, в том числе в труднодоступных местах (щелях, глухих и сквозных отверстиях и др.). К сожалению, это преимущество одновременно является и недостатком, так как влечет за собой усложнение защиты контактных поверхностей на ПУ и соединителях. Для реализации метода разработано специализированное оборудование. По целому ряду причин, особенно экономических, будущее этого метода видится в первую очередь в области микроэлектроники.

Обзор различных полимерных защитных покрытий был бы неполным без упоминания о так называемой «зеленке», хотя зеленый цвет такого покрытия совершенно не обязателен. Поскольку паяльная маска остается на поверхности ПП, то одновременно выполняет и роль влагозащитного покрытия. Различают маску поверх оплавленного припоя (SMOTL) и маску поверх открытой меди (SMOBC). Нанесение маски поверх оплавленного припоя предпочтительнее для ПП, работающих в жестких условиях. Следует отме-

тить, что при использовании групповой пайки волной припой под маской также расплавляется. При этом возможны разрушение маски, появление раковин и образование перемычек между соседними проводниками при высокой плотности монтажа. На ПП с поверхностно монтируемыми компонентами чаще всего наносят маску поверх открытой меди. К сожалению, паяльная маска при всех ее преимуществах не обеспечивает влагостойкость ПУ на 100 %, поскольку места пайки ЭРЭ остаются незащищенными.

Принципиально иной подход к решению проблемы повышения влагостойкости печатного монтажа заключается в следующем. Как уже упоминалось, влагозащитное покрытие – лишь диффузионный барьер на пути влаги. Что же произойдет, если этот барьер будет пройден? Влага окажется один на один с диэлектриком печатной платы. И влагостойкость будет определяться уже свойствами диэлектрического основания, в первую очередь свойствами его поверхностного слоя. В качестве основания обычно используется стеклотекстолит. Для него, как и для всех композиционных материалов, характерна дефектность структуры, особенно на границе раздела стекло – эпоксидная смола. Следствием этого являются капиллярная пористость, повышенное влагопоглощение и, наконец, снижение электроизоляционных свойств во влажной среде. Проблема не нова. Поэтому в арсенале разработчиков композиционных материалов накопилось множество приемов, позволяющих уменьшить дефектность структуры. Полностью же устранить ее практически невозможно. Таким образом, изготовители ПП – своеобразные заложники мастерства разработчиков и изготовителей фольгированных стеклотекстолитов. О получаемом результате они могут узнать лишь по завершении технологического процесса изготовления ПП. Однако электроизоляционные характеристики оснований ПП, независимо от исходного состояния стеклотекстолита, можно повышать, используя так называемое полимеризационное наполнение. Суть технологии, предложенной автором, заключается в том, что дефекты структуры стеклотекстолита устраняются в готовой ПП методом порозаполнения, известным из других областей техники. Для порозаполнения используются полимеризационноспособные композиции на основе бифункциональных мономеров, содержащие вещественные инициаторы полимеризации. Основные операции при этом: заполнение дефектов структуры стеклотекстолита, в том числе дефектов структуры эпоксидной смолы, простым погружением ПП в композицию; удаление избытка композиции с по-

верхности ПП промывкой в воде; □полимеризация композиции в объеме стеклотекстолита при термообработке.

Особенности технологии и состава композиции гарантируют отсутствие заполимеризованной композиции на поверхности контактных площадок и стенок переходных металлизированных отверстий.

Использование данной технологии позволяет повысить сопротивление изоляции ПП в среднем на 1–3 порядка, а в отдельных случаях (ремонт многослойных ПП) даже на восемь порядков. Полимеризационное наполнение не исключает использования дополнительного лакового покрытия и/или паяльной маски. Более того, как оказалось, оно эффективно даже для ПП, уже имеющих паяльную маску.

На критику собственного детища рука не поднимается. Автор предоставляет это своим оппонентам. Можно лишь сказать, что использование предложенной технологии возможно в нескольких вариантах. Первый предусматривает ее применение для ремонта ПП с пониженным сопротивлением изоляции. Доказано, что экономическая и техническая эффективность этого решения не вызывает сомнений. Второе направление – использование технологии в массовом масштабе для повышения надежности ПП. Для изготовителя ПП это потребует дополнительных расходов, а экономический эффект перейдет к потребителю. И, наконец, полимеризационное наполнение может быть успешно использовано для решения актуальной проблемы микроминиатюризации ПП.

В настоящее время на российском рынке широко предлагаются аэрозольные химические препараты различного назначения для производства, эксплуатации и сервисного обслуживания электронного оборудования. Это растворители, лаки, смазки и т.п. Препараты поставляются целым рядом зарубежных фирм под торговыми марками Cramolin, Contakt Chemie, Chemtronics и др. Преимущества аэрозольных препаратов очевидны. Очевидны и потенциальные их потребители. Не вызывает сомнений и эффективность, в том числе экономическая, применения данных препаратов в первую очередь на стадии освоения производства новых изделий (макетирование, изготовление опытных образцов установочных партий). Среди многообразия препаратов есть лаки, предназначенные для влагозащиты

ПУ. Специалистов, видимо, больше всего заинтересует аналог лака УР-231 – полиуретановый лак Urethane 71.

По данным его разработчиков, покрытие этим лаком образует прочную и гибкую водоотталкивающую пленку с хорошими электроизоляционными свойствами, высокой химической и термостойкостью. Рекомендуются акриловые изоляционные лаки (Plastik 70) и кремнийорганические лаки (Silisol 73).

Зарубежными фирмами предлагаются также различные гидрофобизирующие жидкости, в том числе жидкости, способные вытеснять воду (Fluid 101). Аналогичные жидкости, правда, в менее широком ассортименте изготавливают и отечественные предприятия.

При полимеризационном наполнении дефекты структуры стеклотекстолита в ПП заполняются жидкой композицией, которая при термообработке превращается в твердый полимер с высокими электроизоляционными свойствами. А если жидкость уже обладает высокими электроизоляционными, да еще и гидрофобными свойствами, стоит ли ее отверждать? Иногда возникают ситуации, что натурные испытания проще и дешевле общепринятой процедуры, заканчивающейся типовыми испытаниями. Печатные узлы на ПП с паяльной маской, поверхность которых дополнительно обработана жидкостью Fluid 101, успешно эксплуатируются на объектах нефтедобычи уже в течение нескольких лет. Конечно, данное решение не следует воспринимать как абсолютную истину. Годами систему постановки изделий на производство никто не отвергает. И будет очень хорошо, если кто-то возьмется за детальную проверку этого решения по классическим канонам. При положительном исходе даже в частных случаях просматривается удачное решение проблемы 100 %-й защиты поверхности ПП с паяльной маской и, благодаря этому, отказа от дополнительных лаковых покрытий.

В заключение следует отметить, что проблема повышения влагостойкости печатного монтажа, несомненно, комплексная. Конечный результат, как правило, определяется удачным сочетанием конструктивно-технологических характеристик изделий и тщательным соблюдением технологии изготовления на всех ее этапах. Автор не претендует на абсолютную полноту обзора всех направлений в области влагозащиты печатного монтажа, а также абсолютную

правильность своих высказываний и с благодарностью воспримет любые замечания и предложения, в той или иной мере касающиеся данной проблемы.

Глава 6

Сущность и особенности сборки радиоэлектронных средств

6.1. Анализ точности сборочного соединения

6.1.1. Основные понятия теории точности

Важной характеристикой производственных процессов является достижение требуемой точности их выполнения, которая определяется допустимыми величинами первичных погрешностей. Под точностью изготовления понимают степень соответствия полученных характеристик детали или узла РЭС заданным техническим условиям.

Анализом точности основных операций проектирования технологического процесса называется изучение причин возникновения погрешностей, способов их устранения и предупреждения.

Первичные погрешности, возникающие вследствие колебаний физико-химических процессов производства, условно подразделяются на конструкторские и производственные.

Конструкторские погрешности – это такие погрешности, которые возникают в процессе проектирования РЭС, разработки и проектирования технологической оснастки для ее изготовления и настройки. Причины таких погрешностей заключаются в замене точных формул приближенными, в использовании приблизительных данных для различных коэффициентов, в округлении полученных величин. Конструкторские погрешности возникают также в результате недостаточного учета реальных условий эксплуатации (температуры, вибраций, нагрузок и т.п.) и недостаточно тщательной предварительной проверки конструкций РЭС перед запуском их в производство. Расчет и анализ конструкторских погрешностей при проектировании базируются на теории чувствительности.

Производственными называются такие погрешности, которые возникают в процессе изготовления элементов РЭС и их сборки. Производственные погрешности в свою очередь подразделяются на систематические и случайные. Систематические погрешности вызываются определенно действующими, детерминированными при-

чинами. Значение этих погрешностей и знак их отклонения от среднего значения номинала постоянны во времени. Например, неточность в измерительном устройстве станка для резки проводов вызывает погрешность длины отрезков, которая будет носить систематический характер. Случайные погрешности – это погрешности, имеющие для различных элементов партии различные значения, характер изменения которых не может быть определен без статических методов обработки. Случайные погрешности вызываются неточностью установки детали, инструмента, колебаниями припусков, неравномерностью обработки, непостоянством состава применяемых материалов и т.п.

Производственные погрешности, характеризующие степень точности технологического процесса, определяются двумя методами: расчетным и статистическим. Расчетный метод основан на использовании математической зависимости между величиной погрешности и причиной, вызвавшей ее, а статистический метод – на теории вероятности и математической статистике.

В зависимости от объекта исследования понятие производственной погрешности видоизменяется. Так, для РЭС в целом производственные погрешности представляют собой колебания характеристик составных частей, поступающих на общую сборку, обусловленные неточностью их изготовления. Ошибка показаний РЭС определяется колебаниями характеристик датчика, электрической дистанционной передачи, указателя и других элементов, входящих в общую сборку. При этом следует иметь в виду, что возможны взаимная компенсация погрешностей сборочных элементов, трансформация законов их распределения вследствие избирательности погрешностей и изменение результативной погрешности прибора вследствие возможности в ряде случаев регулирования собранной аппаратуры.

Наиболее часто встречаются первичные производственные погрешности, получающиеся при отклонении выполняемого технологического процесса от расчетного.

6.1.2. Систематические и случайные погрешности

Рассмотрим основные факторы, вызывающие производственные погрешности.

Систематические погрешности в зависимости от причин, их порождающих, можно разделить на следующие группы:

1) методические погрешности;

2) погрешности, порождаемые сознательно допускаемыми отступлениями от точной схемы процесса обработки;

3) погрешности, порождаемые неточностями оборудования, инструмента и оснастки;

4) погрешности, порождаемые деформациями в системе станок – инструмент – деталь под влиянием действующих на эту систему усилий;

5) погрешности, порождаемые температурными деформациями;

6) погрешности, порождаемые деформациями, возникающими вследствие остаточных напряжений.

Погрешности методического характера присущи данному методу получения деталей и обусловливаются теоретической невозможностью обеспечения точности изготовления заданной детали. Примером может служить невозможность получения заданных малых характеристик (например, сопротивления) пленочной схемы из-за дифракции электронного луча при напылении.

Погрешности, порождаемые сознательно допускаемыми отступлениями от точной схемы течения технологического процесса, могут быть допущены в тех случаях, когда эти отступления позволяют упростить и удешевить процесс обработки, а величина их такова, что они в сумме с прочими погрешностями не превышают допуска.

Погрешности, порождаемые неточностями станков, приспособлений и инструмента, возникают как следствие дефектов оборудования. Допускаемые неточности новых станков в ненагруженном состоянии (так называемые нормы точности станков) и методы их испытания на точность приведены в соответствующих ГОСТах. Кроме неточностей изготовления, следует учитывать также неточности, происходящие вследствие износа станка. Влияние той или иной неточности станка на точность обработки (изготовления) в ряде случаев можно устранить с помощью компенсаторов.

Допускаемые точности инструмента регламентируются ГОСТами и нормалями. Кроме неточностей изготовления инструментов, нужно учитывать неточности, порождаемые их износом.

Погрешности, порождаемые деформациями системы «станок – инструмент – деталь» под действием усилий резания, возникают из-

за того, что система, включающая все устройства и приспособления, связывающие ее отдельные звенья, не является абсолютно жесткой. Под действием прилагаемых к этой системе усилий в ней происходят деформации, являющиеся одним из основных источников погрешностей обработки.

Все деформации системы можно разделить на две категории:

1) деформации обрабатываемых деталей, деформации отдельных деталей станков, приспособлений и инструмента;

2) деформации в местах соединений деталей и узлов станка.

Деформации обрабатываемых деталей под действием зажимных усилий и усилий резания, а также деталей станков, приспособлений и инструментов в принципе можно рассчитать обычными методами расчета сопротивления материалов.

Причинами, вызывающими деформации в местах соединения деталей и узлов станка, являются зазоры и упругие отжатия в стыках; последние происходят главным образом из-за деформации неровностей на стыковых поверхностях. Из-за этих деформаций изменяется взаимное расположение частей станка, что оказывает большое влияние на точность обработки.

Погрешности, порождаемые температурными деформациями, происходят под действием:

а) тепла, выделяющегося при трении между отдельными деталями станка;

б) тепла, выделяемого в процессе резания;

в) колебаний температуры в помещении.

Деформации, возникающие вследствие остаточных напряжений, можно разделить на следующие категории:

а) напряжения, возникающие при заготовительных операциях (литье, сварка, ковка и штамповка);

б) напряжения, возникающие при механической обработке резанием;

в) напряжения, возникающие при термообработке. Влияние этих погрешностей можно уменьшить, улучшив конструкцию детали, совершенствуя методы обработки, вводя в технологический процесс специальные операции (например, старение).

Если обработать партию деталей по одному и тому же технологическому процессу, то их размеры будут различаться. Это явление называется рассеиванием размеров. Рассеивание размеров – ре-

зультат действия многочисленных производственно-технологических факторов, степень влияния каждого из которых в отдельности невелика. Если какой-либо фактор явно доминирует над остальными, то он может и должен быть рассмотрен отдельно, а погрешность, вызываемая им, рассчитана как систематическая или случайная. К случайным факторам относятся колебания припусков на обработку, механических свойств материала, усилий, величины подачи и т.п. Случайные погрешности рассчитываются методами математической статистики. Основное средство статистического метода оценки случайных погрешностей – построение кривых распределения. Анализ факторов, влияющих на точность производства радиоэлектронных деталей, как показали многочисленные исследования, подчиняется закону Гаусса.

Уравнение кривой нормального закона распределения имеет вид

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(x - x_{\text{ср}}\right)^2}{2\sigma^2}}, \qquad (72)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение; σ^2 – дисперсия; $x_{\text{ср}}$ – математическое ожидание; x – текущее значение измеряемой величины.

Среднеквадратическое отклонение, определяемое экспериментально, будет равно

$$\sigma_{\text{э}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{k} n_i \frac{\left(x_i - x_{\text{ср}}\right)^2}{N}}, \qquad (73)$$

где $$\overline{x} = \frac{\sum_{i=1}^{k} x_i n_i}{N} = \frac{x_1 n_1 + \ldots + x_k n_k}{n_1 + n_2 + \ldots + n_k},$$

где k – число интервалов отклонений; $n_1, n_2, \ldots, n_k$ – количество деталей в каждом интервале; N – общее количество деталей; n_i – частота в i-м интервале (i = 1, 2, ..., k).

Полная база рассеивания нормального закона Δp будет равна 6σ, и при налаженном технологическом процессе должно быть выполнено условие $6\sigma \le \delta$, где δ – поле допуска детали.

Рассматриваемый метод широко используется для анализа процессов механической обработки. Желая установить степень влияния какого-либо фактора на точность обработки, технолог сравнивает кривые распределения, построенные в результате измерения двух партий деталей. Количество деталей, подлежащих измерению для определения среднеквадратического отклонения, зависит от точности, с которой необходимо определить это отклонение.

Из математической статистики известно, что среднеквадратическая ошибка при определении среднеквадратического отклонения равна $\pm\dfrac{\sigma}{\sqrt{2(n-1)}}$, а при определении среднеарифметического значения $\pm\sigma/\sqrt{n}$, где n – количество измерений.

Для получения σ с точностью ±5 % нужно решить уравнение

$$0,05\sigma = \frac{\sigma}{\sqrt{2(n-1)}}.$$

В тех случаях, когда количество измерений (деталей) меньше 25, необходимо оценить степень точности и надежности $x_{ср}$ и σ, полученных в результате измерения. Такую задачу можно решить следующим образом. Пусть среднеарифметическое значение, полученное на основании измерения n деталей, равно $x_{ср}$, а среднеквадратическое значение σ. Зададим точность ε, с которой мы хотим определить $x_{ср}$, и найдем в зависимости от количества измеренных деталей n надежность α.

Надежность α равна вероятности того, что истинное среднеарифметическое a находится в пределах $x_{ср} - \varepsilon < a < x_{ср} + \varepsilon$.

Точность определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{t_1\sigma}{\sqrt{n}},$$

откуда

$$t_1 = \frac{\varepsilon\sqrt{n}}{\sigma}.$$

Зная n и ε, можно найти t_1 и, пользуясь табличными данными, определить вероятность p.

При известном значении вероятности отказа находим надежность функционирования системы $1 - p$.

Следует отметить, что при статистических методах анализа важно знать, с какой степенью приближения эмпирическую кривую распределения, характеризующую какой-либо технологический процесс, можно принять за кривую нормального распределения. Эта задача решается на основе хорошо разработанной теории оценок.

Предельные значения большинства перечисленных погрешностей могут быть установлены из аналитических зависимостей или найдены экспериментально. Допустимые при настройке РЭС погрешности систематического характера могут быть компенсированы дополнительной подстройкой.

Следует отметить, что технологические погрешности обычно составляют основную долю показаний РЭС. Поэтому определение их величины является первоочередной задачей при решении размерной и физической взаимозаменяемости.

Особенно важным является вскрытие закономерностей образования погрешностей сборочных операций.

Предполагая, что детали точны и качество их соответствует техническим условиям, рассмотрим основные причины и пути образования погрешностей сборочных операций. К ним могут быть отнесены:

1) колебания физических (функциональных) параметров деталей, комплектуемых в данном сборочном элементе, и изменение этих параметров в процессе сборки из-за ее специфических условий;

2) деформации деталей при их соединении, колебания усилий соединения;

3) неопределенность положения деталей в пределах зазора замыкающего звена;

4) несоосность деталей и их неуравновешенность;

5) неправильность ориентации деталей вследствие погрешностей их формы;

6) контактные деформации и переходные сопротивления;

7) недостаточные прочность и сопротивление изоляции, короткозамкнутые витки, изменение емкости монтажа и взаимные электрические влияния деталей и узлов;

8) старение деталей и сборочных элементов; местные нарушения их свойств вследствие конструктивных дефектов, случайных перенапряжений при сборке, хранении и контроле.

Расчет точности сборочного элемента может охватывать несколько параметров (погрешностей) из числа рассмотренных (или других), а также иметь целью определение доминирующей погрешности.

6.2. Схемы сборки радиоэлектронных средств

Простейшим сборочно-монтажным элементом является деталь, характеризуемая отсутствием каких-либо соединений.

Характерным признаком узла с технологической точки зрения является возможность его сборки отдельно от других элементов изделия.

Узел, входящий непосредственно в изделие, называется группой.

Все остальные узлы, собираемые до образования группы, называются подгруппами разного порядка. Так, подгруппа, входящая в группу, называется подгруппой первого порядка, входящая в нее – второго порядка и т.д.

Расчленение изделий на сборочные элементы производится путем построения схемы сборочного состава. Наибольшее распространение получили схемы сборки с базовой деталью и схемы «веерного» типа.

Схема сборки «веерного» типа показывает, из каких деталей образуется сборка. Например, что детали 1.1 и 1.2 входят в сборку Сб. 1.1, которая в свою очередь входит в часть изделия Сб. 1.

Схема сборки «веерного» типа

Направление движения деталей и узлов показано стрелками. К базовой детали 1.1 вначале присоединяется деталь 1.2, в результате образуется сборочный узел К1 (К 1.1), затем присоединяется Сб. 1.2 и т.д., до получения готового изделия.

Каждый компонент изделия на схеме обозначают прямоугольником, разделенным на три части:

Наименование комплекта	
Номер комплекта	Число комплектов

Достоинством такой схемы являются ее простота и наглядность, но она не отражает последовательность сборки.

Если на схемах сборки даются указания о технологических операциях, например, «Узел Сб. 2.3 припаять к узлу Сб. 4.2», «просверлить» и т.д., то она называется технологической схемой сборки (рис. 116).

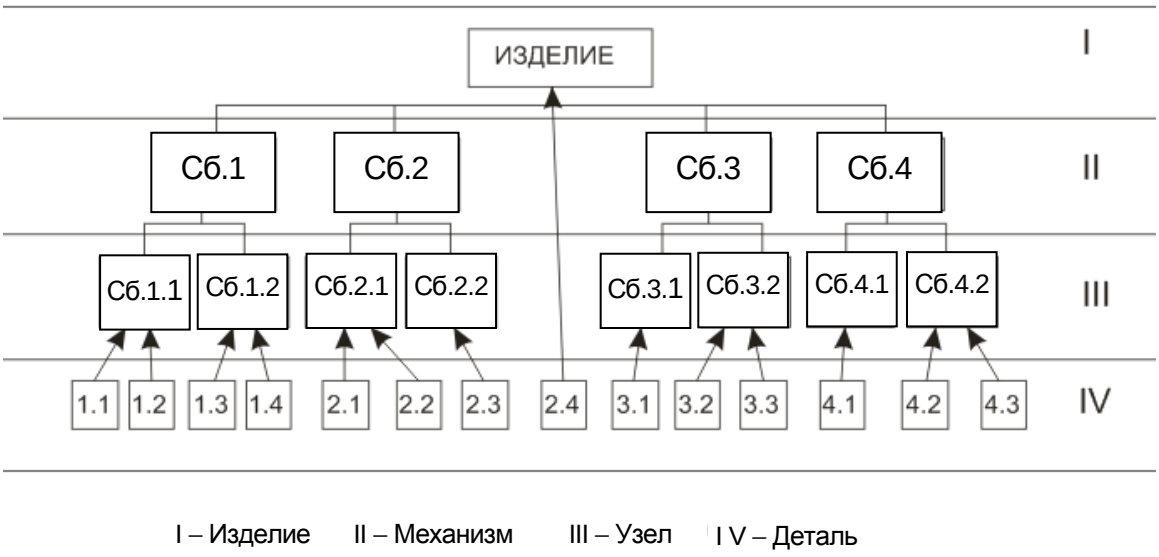


Рис. 116. Схема сборки «веерного» типа

Схема сборки с базовой деталью отражает последовательность процесса сборки. Базовой деталью является плата, панель или другая деталь, с которой начинается сборка, направление движения деталей и сборочных единиц показано стрелками (рис. 117).

Как правило, развернутые схемы сборочных элементов могут быть превращены в технологические схемы сборки внесением дополнительных надписей, определяющих содержание сборочных операций и приемов.

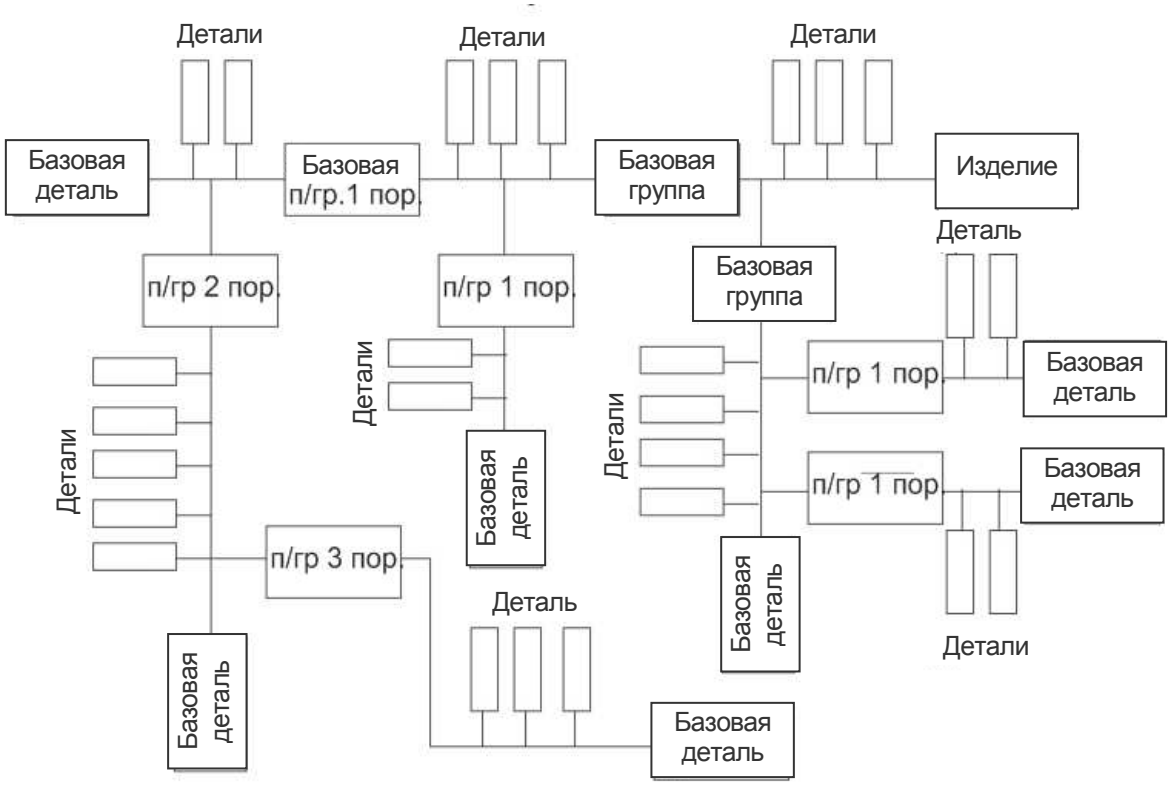


Рис. 117. Схема сборки с базовой деталью

Схема сборки сложного изделия может оказаться весьма громоздкой. В таких случаях составляют укрупненную схему, включающую лишь группы и детали, входящие непосредственно в изделие, а также развернутые схемы для каждой из групп изделия. Схемами сборки пользуются при разработке ТП наряду со сборочными чертежами и ТУ. Правильно разработанный ТП сборки должен обеспечить электрофизическую и размерную взаимозаменяемость. Для ее обеспечения проводят соответствующие расчеты. Наиболее часто приходится рассчитывать размерные и электрические цепи.

ТП сборки оформляется в виде технологических операционных карт, в которых указывают содержание сборочных операций, применяемое при сборке оборудование, приспособления, инструмент, квалификацию и специальность исполнителя, норму времени на операцию, а также перечень деталей, сборочных единиц и вспомогательных материалов, которые должны быть поданы на рабочее место.

Анализ конструкции и технологической документации серийных изделий показывает, что для подавляющего объема сборочных работ можно разработать типовые операции, применяемые для изделий сходного назначения.

Результаты анализа ТП сборки типовых изделий свидетельствуют о целесообразности классификации процессов сборки по конструкционно-технологическим признакам. За основные элементы ТП приняты операции, содержащие некоторою совокупность переходов, сохраняющуюся при изменении конструкции изделия и масштаба производства. Такие типовые операции могут быть нормализованы. При этом могут быть выделены следующие классы типовых операций:

- вспомогательные и подготовительные;
- крепления и стыковки;
- прокладки и соединения электрожгутов, радиокабелей, тяг механических передач;
- регулировки и отладки функционирования систем;
- приемо-сдаточного контроля;
- специальные (нетиповые) операции.

После построения схемы ТП сборки изделия технолог для большинства работ может подобрать типовые операции по отраслевым нормалям. Операционные карты разрабатывают только на те операции, которые специфичны для данной конструкции.

Применение типовой или нормализованной технологии значительно сокращает длительность технологической подготовки производства изделия. Для наиболее ответственных соединений высокой точности составляют карты конструктивной технической увязки. В этих картах указывают все технологические условия на соединение и принципиальные схемы рабочих и контрольных приспособлений.

Сравнение различных вариантов построения схем и их анализ затруднены отсутствием каких-либо отправных положений для их построения. Введение таких четких отправных положений, хотя и усложняет анализ, зато дает возможность получить численные показатели, характерные для схем отборочных элементов. Разработаны следующие отправные положения построения схем сборочных элементов:

1) вначале строятся исходные схемы, служащие основанием для последующей разработки рабочих схем сборочных элементов;

2) исходные схемы строятся при условии их независимости от программы выпуска изделий;

3) сборочные единицы исходных схем образуются при условии независимости их «технологического существования», т.е. предполагается, что они могут отдельно собираться, храниться, транспортироваться, контролироваться и т.д.;

4) минимальное количество деталей (т.е. элементов изделия, получаемых без применения сборочных операций), необходимое для образования сборочной единицы первой ступени сборки, равно двум;

5) минимальное количество деталей, присоединяемых к сборочной единице данной группы, необходимое для образования сборочного элемента высшей степени, равно единице;

6) исходная схема сборочных элементов строится при условии образования наибольшего количества сборочных единиц;

7) исходная схема сборочных элементов обладает свойством непрерывности, т.е. предполагается, что каждая последующая ступень сборки не может быть образована без наличия предыдущей ступени сборки.

Теоретическая схема сборки

Учитывая конкретные производственные условия, сборочный процесс можно расчленить по рабочей схеме сборочного состава на меньшее или большее число операций, используя принципы дифференциации или концентрации сборочных операций.

Используя теоретическую схему и имея в виду то, что первая ступень схемы не является сборочной, можно записать выражение, устанавливая связь между компонентами изделия и самим изделием одной и той же ступени:

$$И^n = S_{n+1},$$

где И – изделие; S – компонент изделия; n – ступень сборки.

$И^n$ – степень сложности – отражает количество ступенек сборки в изделии и этим дает представление о сложности сборочного процесса. Однако этот показатель не дает представления о сборочном составе каждой ступени сборки, так как изделия одинаковой степени сложности могут быть весьма различные по количеству сборочных элементов (рис. 118).

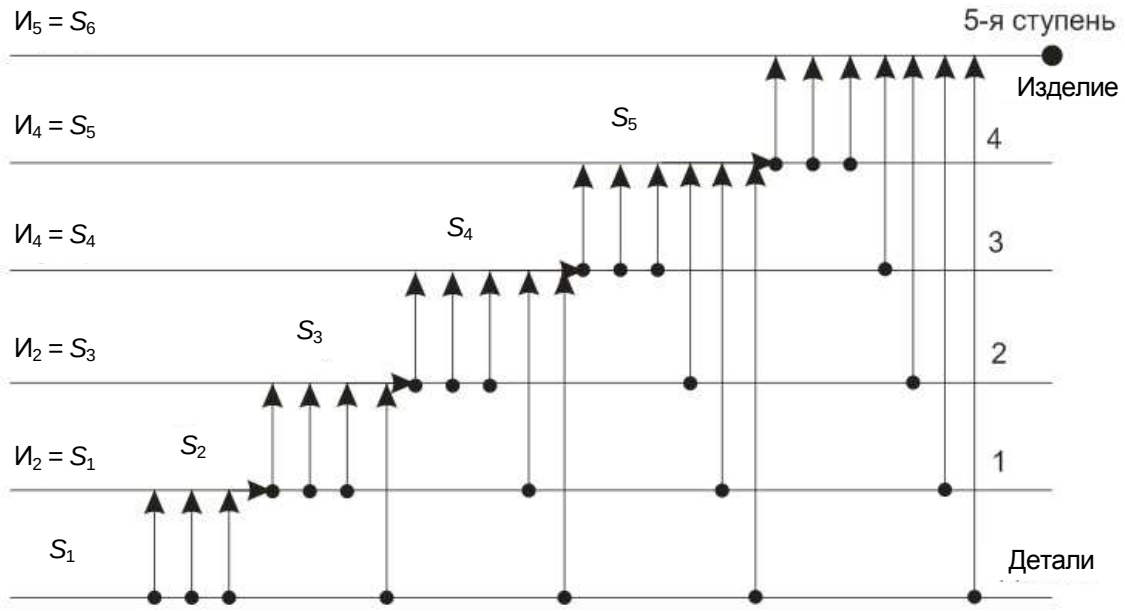


Рис. 118. Теоретическая схема сборки

Для характеристики изделия по количеству элементов, входящих в каждую ступень сборки по исходной схеме, вводится понятие о средней полноте сборочного состава (большая или меньшая полнота наличия в каждой ступени компонентов низших ступеней).

Минимальный сборочный состав компонентов последовательных ступеней сборки:

$$S_2 = S_1 + S_1 = 2S_1$$

$$S_3 = S_2 + S_1$$

$$S_4 = S_3 + S_1$$

……..

$$S_n = S_{n-1} + S_1$$

Средний сборочный состав компонентов последовательных ступеней сборки:

$$S_n = \sum_{i=n-1}^{i=1} m_i s_i,$$

где m_i – коэффициенты кратности.

Сумма коэффициентов кратности, начиная с первой ступени сборки, равна количеству сборочных единиц исходной схемы сборочного состава, т.е.

$$Q = \sum_{i=2}^{i=n-1} m_i,$$

Q – число сборочных единиц теоретической схемы сборочного состава (число операций по теоретической схеме сборки).

Средняя полнота сборочного состава изделия может быть выражена следующим соотношением:

$$P_{\text{ср}} = Q / n - 1 = \sum_{i=2}^{i=n-1} m_i \, (n - 1),$$

где n – число ступеней сборки.

Данная методика анализа схем сборочного состава носит весьма объективный характер. Для ее практического использования необходимо накопить материал по расчету характеристик наиболее распространенных РЭС. Накопленные статистические материалы позволяют выявить тенденция развития принципов построения современной РЭС и сформулировать преимущества и недостатки тех или иных конкретных значений характеристик их расчлененности.

Модуль расчлененности применим для сравнения ТП сборки:

$$M = N / Q,$$

где N – число операций, запроектированных для конкретных организационно-технических условий по рабочей схеме сборочного состава; Q – число операций по теоретической схеме.

При $M < I$ – процесс концентрирован, при $M > 1$ – дифференцирован.

Недостатками концентрированного ТП сборки являются:

- большая продолжительность времени (никла) сборки одного изделия;
- трудность механизации и автоматизации концентрированных сборочно-монтажных операций, которые исключают ее применение в серийном и массовом производстве.

Дифференцированная сборка предполагает обязательное расчленение сборочно-монтажных работ на большое число предельно простых операций, состоящих из нескольких или даже одного технологического перехода, выполняемых одновременно большим количеством рабочих невысокой квалификации. Таким образом, дифференциальная сборка резко уменьшает цикл сборки, облегчает механизацию и автоматизацию сборочно-монтажных работ, создает

условия для правильного использования рабочих в соответствии с их квалификацией.

Следует помнить, что излишняя дифференциация приводит к возрастанию потерь вспомогательного времени на транспортировку по конвейеру, увеличению производственных площадей, повышению утомляемости рабочих при выполнении простых однообразных операций. Кроме того, при очень большой программе выпуска изделий расчетный ритм может оказаться меньше экономически рентабельной продолжительности операции.

В заключение отметим, что теоретическая схема сборки, представляя собой наглядное изображение сборочного процесса, является основным документом, фиксирующим исходный ТП сборки.

6.2.1. Правила построения сборочной операции

При проектировании определяют:

- последовательность и возможность совмещения во времени технологических переходов;
- выбирают оборудование, приспособления и инструмент;
- составляют схемы наладки оборудования;
- устанавливают режимы работы;
- определяют нормы времени на технологические операции и соответствующие разряды.

Последовательность операций выбирают на основе схемы сборочного состава, соблюдая следующие требования:

1) предшествующие операции не должны затруднять выполнение последующих;

2) при поточной сборке разбивка процесса на операции должна осуществляться с учетом темпа сборки;

3) после операций, содержащих регулировку или пригонку, а также после операций, при выполнении которых может появиться брак, необходимо предусмотреть контрольные операции.

При разработке и сборке в серийном и массовом производстве последовательность и схема сборки могут быть установлены разборкой и последующей сборкой экспериментального образца изделия, запускаемого в производство. При разборке образца составляют схему сборки, а при сборке – последовательность сборочных операций.

Трудоемкость и экономическая целесообразность сборочно-монтажных работ во многом определяются организационной формой сборки, при выборе которой следует руководствоваться следующими положениями:

1) стационарная форма сборки применяется в единичном и мелкосерийном производстве, в серийном производстве эта форма сборки применяется лишь тогда, когда затрачиваемое на нее время значительно меньше ритма (такта);

2) если по технологическим соображениям процесс сборки не может быть разделен на отдельные операции, а время сборки сборочной единицы или изделия кратно ритму, то в условиях массового и крупносерийного производства сборку целесообразно проводить стационарно и одновременно на нескольких рабочих местах;

3) если время сборки изделия значительно превышает ритм, то в массовом и серийном производстве следует применять подвижную поточную сборку как экономически наиболее целесообразную.

При определенном подборе различных изделий, имеющих однотипные процессы сборки, поточная подвижная сборка является экономически выгодной и в условиях мелкосерийного производства. Для того, чтобы правильно выбрать организационную форму сборки, следует правильно установить, будет ли сборка поточной или нет.

Поточная сборка характеризуется непрерывностью процесса сборки, построенного на дифференцированных операциях, и выпуском готовой продукции через определенные промежутки времени, которые называются тактом:

$$r = t / N_т,$$

где $N_т$ – объем выпуска изделий за время t. Непрерывность процесса предусматривает выполнение сборочных операций без перерывов, т.е. без пролеживания объекта сборки в ожидании той или иной операции.

Поточная сборка может быть применена как при движущемся, так и при неподвижном объекте сборки.

При нетранспортабельности объекта (большой вес, габариты) применяется неподвижная поточная сборка, когда собираемый объект находится на одном и том же месте или сборочном стенде, а сборщики равномерно движутся вдоль линии объектов сборки и выполняют определенные операции.

При проектировании ТП поточной сборки необходимо обеспечить синхронность всех операций сборки, т.е. длительность каждой операции должна быть кратной или равна такту выпуска. С этой целью некоторые переходы могут переноситься из одной операции в другую, не обязательно смежную, но при условии, что это не нарушит необходимой технологической последовательности сборки.

Операция считается синхронизированной, если коэффициент загрузки рабочих мест η, занятых на выполнении этой операции, удовлетворяет условию

$$0{,}9 \le \eta \le 1{,}1.$$

Коэффициент загрузки представляет собой отношение расчетного числа $C_р$ рабочих мест на данном процессе сборки к принятому их числу $C_п$:

$$\eta = C_р / C_п.$$

Расчетное число $C_р$ рабочих мест определяется как отношение штучного времени всех операций к такту выпуска:

$$C_р = \Sigma t_{шт} / r.$$

Производственный участок, на котором производится поточная сборка изделий, называется поточной линией сборки. По степени специализации или номенклатуре выпускаемых изделий поточные линии бывают однопредметными и многопредметными. На однопредметной линии, применяемой в основном в массовом и крупносерийном производстве, собираются изделия только одного наименования. На многопредметной поточной линии собирается несколько видов изделий, сходных по конструктивным и технологическим признакам. В зависимости от объема выпуска такие линии могут быть с последовательным, параллельным и смешанным чередованием изделий.

По стабильности такта выпуска поточные линии сборки делятся на линии с регламентированным и со свободным тактом выпуска.

На линиях с регламентированным тактом ритм работы задается определенным устройством, поэтому соблюдение такта строго обязательно. На линиях со свободным тактом ритм работы соблюдается только за большие промежутки времени, например, за смену, в пределах которой сборка производится с различным тактом выпуска.

Поточные линии сборки, как правило, образуются конвейерами различного конструктивного исполнения. В приборе- и радио-

аппаратостроении наиболее часто применяются конвейеры с двухрядным расположением рабочих мест в шахматном порядке. При этом рабочие обращены лицом в сторону, противоположную движению конвейера.

Конвейеры с однорядным расположением рабочих мест применяют при сборке малогабаритных аппаратов. При этом рабочие обращены лицом к движущемуся конвейеру.

При поточном конвейерном способе сборки операции регулировки, настройки и контроля должны быть согласованы с тактом сборки и выполняться в общем потоке на линии общей сборки.

Для бесперебойной работы должно быть предусмотрено определенное количество заделов (изделий с незаконченной сборкой).

Расчет поточных линий сборки включает следующие основные этапы:

1) определение такта выпуска, т.е. интервала времени, через который периодически производится выпуск изделий определенного наименования, типоразмера и исполнения;

2) разработку ТП сборки с обязательной синхронизацией всех операций, включая операции регулировки, настройки и контроля;

3) выбор и расчет транспортных средств или конвейеров;

4) расчет необходимых заделов;

5) определение числа рабочих.

В последнее время находят применение быстроходные конвейеры с адресацией. В отличие от прежних они работают при высоких скоростях движения, так, например, на тихоходных конвейерах оборудование располагается в строгой последовательности в соответствии с процессом изготовления или сборки изделия (прямоточный способ расположения оборудования), и в этом случае ритмичная, слаженная работа конвейера или поточной линии требует ритмичного труда рабочего на каждой операции и в течение всей смены. Такое требование трудно или невозможно выполнить вследствие утомляемости работающих. На линиях с быстроходным конвейером это требование снимается, поскольку они работают в переменном, удобном для них ритме. Он не снимает очередную деталь, проходящую мимо него по конвейеру, если к этому времени не закончил обработку предшествующей детали или сборочной единицы. Эта деталь ввиду высокой скорости движения конвейера все равно к нему вернется «по адресу». Кроме того, рабочий избавлен от необходимости следить за конвейером из опасения пропустить «свою» деталь, что снимает ненужное нервное напряжение.

Высокоскоростной конвейер допускает расположение оборудования не по ТП. Как преднамеренные, так и непредвиденные остановки отдельных станков для подналадки, смены инструмента или оснастки не нарушают производственного процесса на линии.

Таким образом, высокоскоростной конвейер с адресацией выполняет роль регулятора ритма без жесткой регламентации действий оборудования и рабочих, что исключает срывы ТП, а также позволяет распределить работу между рабочими при неодинаковой их производительности в любой пропорции, чего нельзя достичь с помощью конвейера обычного типа.

6.2.2. Согласование ТП сборки по организационным формам

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

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

В соответствии с последовательностью технологических операций процесс сборки (монтажа) делится на сборку (монтаж) отдельных сборочных единиц (плат, блоков, панелей, рам, стоек) и общую сборку (монтаж) изделия. Организационно он может быть стационарным или подвижным с концентрацией или дифференциацией операций. Стационарной называется сборка, при которой собираемый объект неподвижен, а к нему в определенные промежутки времени подаются необходимые сборочные элементы. Подвиж-

ная сборка характеризуется тем, что сборочная единица перемещается по конвейеру вдоль рабочих мест, за каждым из которых закреплена определенная часть работы. Перемещение объекта сборки может быть свободным по мере выполнения закрепленной операции или принудительным в соответствии с ритмом процесса

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

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

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

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

1) изготовление и сборка на многопредметных поточных линиях одновременно нескольких изделий;

2) совмещение на автоматизированных поточных линиях изготовления деталей с их сборкой.

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

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

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

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

Технические пути повышения производительности труда при выполнении монтажно-сборочных работ за счет механизации и автоматизации производства, внедрения новой техники и технологии рассмотрены ниже.

6.3. Виды механических соединений

6.3.1. Разъемные и неразъемные механические соединения

При изготовлении электронной аппаратуры наряду с электрическими широко используются механические соединения, которые разделяются на две группы: разъемные и неразъемные.

Разъемные соединения допускают полную разборку изделия на детали без разрушения их целостности. К ним относятся резьбовое, байонетное, штифтовое, шплинтовое и др. Соединение считается неразъемным, если его разборка сопровождается разрушением материалов или деталей, с помощью которых оно осуществлено. Неразъемные соединения выполняют пайкой, сваркой, склеиванием, развальцовкой, склепыванием и т.д.

Резьбовые соединения (свинчивание) в общем объеме занимают наибольший удельный вес, но характеризуются высокой стоимостью и трудоемкостью.

Склепывание применяют для конструкций, работающих при высоких температурах и давлениях, для прочных соединений неметаллических деталей с металлами. Недостатками клепанного соединения являются: отсутствие герметичности шва, ослабление материала в месте соединения, концентрация и неравномерное распределение напряжений.

Пайка и сварка конструкционных деталей имеют те же физико-химические особенности, достоинства и недостатки, что и при выполнении монтажных соединений. Некоторые отличия заключаются в технологии: подготовке деталей, выборе материалов, режимов и оборудования.

Склеивание применяют для соединения материалов в самых различных сочетаниях. Соединения, полученные склеиванием, обладают высокой долговечностью, коррозионной стойкостью, теплоизолирующими, звукопоглощающими, демпфирующими свойствами, герметичностью. Технологический процесс склеивания отличается простотой, низкой себестоимостью сборки, легко может быть переведен на поточное производство. В настоящее время широко применяют комбинированные методы неразъемных соединений – клеесварные и клееклепаные.

К недостаткам клеевых соединений следует отнести сравнительно низкую стойкость при повышенных температурах, пониженную прочность при неравномерном отрыве, дефицитность, а также токсичность многих составляющих клеевых композиций.

Развальцовка сопровождается возникновением в соединениях значительных деформаций, которые искажают взаимное положение деталей. Это вызывает необходимость в повышении требований к жесткости используемых приспособлений.

Основным видом разъемных соединений является резьбовое (рис. 119), с помощью которого крепятся панели, переключатели, тумблеры, переменные резисторы, трансформаторы и др.

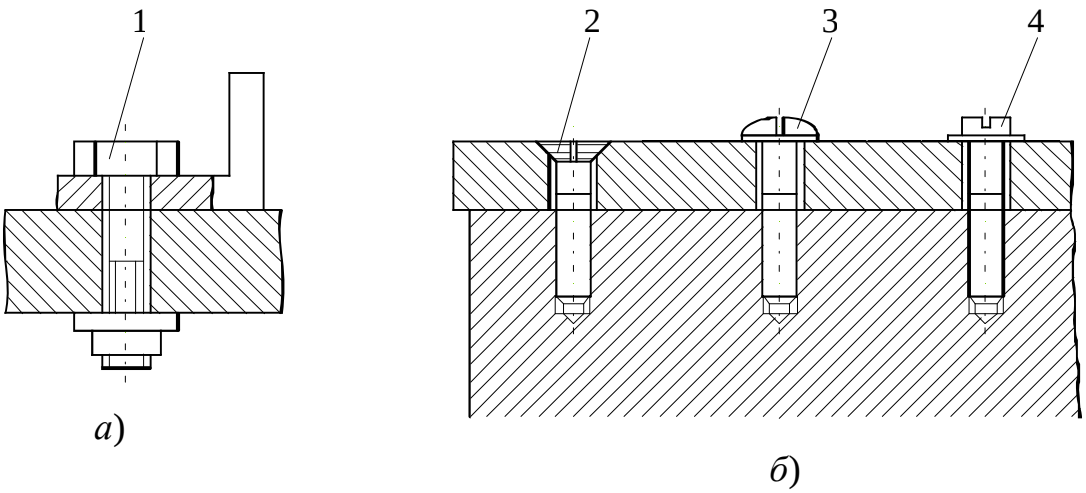


Рис. 119. Резьбовые соединения:
а – болтовое; *б* – винтовое;
1 – болт; 2 – винт с потайной головкой; 3 – винт с полукруглой головкой;
4 – винт с цилиндрической головкой

Для выполнения резьбовых соединений применяются ручной резьбозавертывающий инструмент, полуавтоматическое и автоматическое оборудование.

В условиях крупносерийного и массового производства целесообразно применять автоматическое оборудование, в котором сопряжение собираемых деталей, подача и ориентация крепежа, выполнение сборки соединения осуществляются механизмами в едином технологическом цикле. Однако такое оборудование имеет достаточно сложные конструкции, низкую надежность и высокую стоимость.

Важным условием обеспечения качества резьбовых соединений при работе с использованием механизированного и автоматизированного оснащения является установление необходимого усилия затяжки. Величина момента, прикладываемого к винту или гайке, зависит от того, какой элемент лимитирует прочность. При соединении винтом или болтом момент затяжки определяется их прочностью на растяжение. При завинчивании резьбы в упор момент затяжки определяется прочностью тела винта на кручение или прочностью шлица на смятие. Если резьбовое соединение имеет малое число сопрягаемых витков, то момент свинчивания ограничивается прочностью винта или гайки на срез. При соединении хрупких деталей момент затяжки лимитируется прочностью этих деталей.

Конструкция любого РЭС или его части (узла, блока) представляет собой комплекс взаимосвязанных неделимых частей (деталей). Необходимость разделения конструкции на составные части может вызываться как эксплуатационными функциями и условиями, так и технологическими, экономическими и производственными факторами.

Основным эксплуатационным назначением механических соединений является обеспечение заранее заданного пространственного расположения элементов конструкции и передача энергии (потенциальной или кинетической) от одной части конструкции к другой.

Все возможные виды соединений могут быть разделены на две основные группы – неподвижные и подвижные.

Неподвижные соединения предназначаются для обеспечения неизменного взаимного расположения соединяемых элементов конструкции.

Подвижные соединения предназначаются для обеспечения перемещения одной части конструкции по отношению к другой в заданных пределах.

Эти две группы соединений разделяются в свою очередь на неразъемные и разъемные.

Неразъемные соединения не рассчитаны на разъединение частей конструкции и не могут быть разобраны без разрушения хотя бы одной из соединяемых деталей или соединяющего материала. К ним относятся: склепывание, запрессовка, опрессовка, склеивание, пайка, сварка и др.

Разъемные соединения рассчитаны на возможность разборки частей конструкции и могут быть разобраны без разрушения как соединяемых, так и соединяющих деталей, например, соединение с помощью винтов, болтов и гаек, шпилек, шпонок, загибки и разворачивания выступов и т.п.

Кроме того, соединения могут быть разделены на жесткие и гибкие в зависимости от степени свободы.

Жесткие соединения (подвижные и неподвижные) характеризуются строго ограниченными степенями свободы как соединяемых элементов конструкции, так и практической неизменностью их формы.

Гибкие соединения (подвижные и неподвижные) характеризуются возможностью изменения взаимного расположения соединенных элементов конструкции и их геометрической формы.

По защитным свойствам соединения могут быть классифицированы на пылезащитные, влагозащитные, вакуумно-плотные, жарозащитные и т.п.

6.3.2. Требования, предъявляемые к соединениям

Требования, предъявляемые к соединениям, в основном определяются их функциональным назначением и условиями использования. Однако ряд требований является общим для соединений всех видов и назначений.

Так, все соединения, выполняющие функции передачи механических сил, в первую очередь должны удовлетворять требуемой механической прочности. Кроме того, оговариваются условия, в которых она должна обеспечиваться. Например, характер нагрузки на соединение (постоянная, переменная или знакопеременная), время действия нагрузки, периодичность или закон ее изменения, направление действия и т.п. При этом часто оговаривается характер окружающей среды: относительная влажность; степень загрязненности агрессивными агентами; температура; влажность и т.п.

В конструкциях РЭС часто используются соединения, которые должны удовлетворять одновременно высокой степени механической прочности и хорошей электропроводности, или хорошая механическая прочность должна сочетаться с хорошей электрической изоляцией одной части от другой.

Влияние внешней среды на качество соединения выражается в том, что оно подвергается коррозии, что влечет за собой ослабление отдельных точек соединения либо нарушение всего соединения.

Особенно опасной является электрокоррозия – ее действие повышается с повышением контактной разности потенциалов между соседними материалами. Влажная атмосфера еще усиливает разрушение. В паяных соединениях агрессивными агентами могут быть остатки флюса, а также пропитывающие или обволакивающие компаунды.

В вакуумно-плотных соединениях герметичных конструкций из-за разности внешнего и внутреннего давлений могут возникать механические деформации, нарушающие плотность соединения.

Итак, основные положения, которые должны учитываться при конструировании соединений:

1) соединение должно в максимальной степени удовлетворять своему назначению в условиях, для которых оно предназначено;

2) от соединения нельзя ожидать, чтобы оно в одинаковой мере удовлетворяло всем возможных требованиям и условиях его использования, поскольку это, как правило, в сильной степени усложняет конструкцию;

3) при выборе компромиссного решения основное внимание должно обращаться на максимальное удовлетворение главного функционального назначения соединения;

4) качество соединения определяется не только конструкцией, но в равной степени и технологией его изготовления;

5) места соединений, как правило, в большей степени подвержены воздействию внешних факторов, чем соединяемые части конструкции. Это вызывает настоятельное требование защиты соединений от этих воздействий.

6.3.3. Соединения расклепыванием и развальцовкой

Необходимость соединения металлических элементов заклепками может вытекать из конструктивных, технологических, эксплуатационных и экономических соображений. Прежде чем выбрать заклепочное соединение, конструктор должен оценить все его преимущества и недостатки по сравнению с другими возможными способами соединения.

Основными требованиями, предъявляемыми к рассматриваемому заклепочному соединению, могут быть:

- механическая прочность;
- надлежащая точность;
- точность взаимного расположения соединяемых элементов;
- водонепроницаемость;
- влагонепроницаемостъ;
- пылезащищенностъ;
- хорошая электропроводность;
- технологичность;
- экономичность.

Последние два требования обязательны для любых соединений. В некоторых случаях только они и определяют выбор конструкции соединения.

Они получаются с помощью расклепывания или развальцовки отдельных заклепок или цапф, имеющихся на одной из деталей, выполняющих роль заклепок.

При склепывании (или развальцовке) соединяемые детали сильно сдавливаются, и таким образом между ними возникает трение, препятствующее их взаимному сдвигу.

Конструкции соединений, рассчитанных на большие силовые нагрузки, выполняются горячим способом, причем сжатие деталей происходит главным образом за счет сокращения длины заклепки при ее охлаждении.

В радиотехнических конструкциях горячая клепка почти не применяется, за исключением особых случаев (например, при сборке конструкций антенных сооружений).

Выбор формы заклепки прежде всего зависит от материала и формы соединяемых элементов конструкции. Так, для мягких и эластичных элементов конструкции необходимо, чтобы заклепка имела бы большой диаметр и без галтели, для элементов большой толщины возможно использовать заклепки с потайной головкой, например, если нельзя иметь выступающие элементы.

В большинстве конструкций РЭС особых требований к механической прочности заклепочного соединения не предъявляется. Прежде чем приступить к выбору конструкции заклепочного соединения, нужно установить размер диаметра заклепок, их число и расположение.

Возможны несколько видов клепаного соединения: соединение одной заклепкой, соединение двумя заклепками, соединение заклепочным рядом.

Соединение одной заклепкой может быть использовано в тех случаях, когда соединяемая деталь мала по своим размерам и к механической прочности и точности такого соединения не предъявляется строгих требований.

Соединение двумя заклепками предназначается, как правило, для повышения точности взаимного расположения, которая определяется зазорами между отверстиями и заклепками, точностью расположения отверстий и точностью выполнения ТП клепки.

Соединение заклепочным рядом используется в тех случаях, когда элементы конструкций имеют большую протяженность в одну сторону.

Соединение заклепками неметаллических элементов конструкции имеет свои особенности. Следует различать две основные группы соединений:

- соединения твердых элементов конструкции;
- соединения эластичных элементов.

Первая группа может быть поделена на две подгруппы: первая – механически прочные и хрупкие элементы; вторая – на подверженные сравнительно легкому разрыву при появлении надрезов и мало подверженных разрыву при надрезах.

Для соединения элементов из прочных неметаллов (например, стеклотекстолит) можно использовать сплошные заклепки из мягких металлов, как правило, полупустотелые или пустотелые, не прибегая к ударным клепальным станкам, а развальцовывая стержень заклепки на сверлильном станке специальной оснасткой.

Детали из хрупких неметаллических материалов (керамика, стекло) сложнее в работе – даже при развальцовке полупустотелых или пустотелых заклепок наблюдается растрескивание.

Соединения мягких и эластичных неметаллических материалов с металлическими материалами применяются довольно широко. В основном для уменьшения вероятности брака необходимо увеличивать площади материалов (чтобы избежать разрывов), а также следует учесть, что под давлением заклепки сильно деформируются.

Для неразъемного соединения широко применяют склепывание стальными, медными и алюминиевыми заклепками. Заклепки состоят из цилиндрического стержня с головкой, которая может быть полукруглой, трапецеидальной, потайной и т.д.

Для получения заклепочного соединения высокого качества необходимо правильно выбрать длину заклепки с тем, чтобы замыкающая часть заклепки была хорошо оформлена, а отверстие под заклепку заполнилось металлом без пустот и зазоров.

Склепывание можно производить двумя способами:

1) удары наносят по закладной головке, а замыкающая головка образуется от ударов стержня заклепки о поддержку;

2) удары наносят по замыкающей части, а закладная часть покоится на поддержке.

При закладке цапфы детали шляпка стержня заклепки подается в отверстие до упора с помощью подставки. При непосредственном расклепывании цапф деталей часто применяют подставки с подвижными губками, обжимающими деталь и предохраняющими ее от изгибов и расплющивания в процессе клепки.

Для вставки заклепок в отверстие малого диаметра применяют пинцеты или плоскогубцы, чтобы не повредить головки заклепок, губки плоскогубцев отжигают или укрепляют на них вставки из мягкого металла (латунь, медь). При несоосности отверстия в соединяемых деталях или при недостаточной очистке отверстий, получаемых вырубкой в штампах, применяют развертки, с помощью которых калибруют отверстия. В зависимости от характера воздействия на стержень заклепки различают три способа склепывания: посредством удара, прессование и развальцовка полых заклепок и цапф деталей.

Развальцовка полых заклепок и цапф деталей осуществляется на сверлильных и реже токарных станках. Операции развальцовки и завальцовки могут быть осуществлены и на специальном прессовом оборудовании. С помощью малогабаритных прессов и специальных приспособлений осуществляется запрессование – посадка цилиндрических и конических шпилек и подобных деталей.

Для клепальных работ, для расчеканки, завальцовки и развальцовки применяются специализированные и специальные клепальные станки с механическим приводом. Гидравлические прессы для выполнения неразъемных соединений применяются главным образом при производстве предварительных сборок на участках металлообрабатывающих цехов и гораздо реже – в линиях окончательной сборки изделий.

Широкое распространение получили рычажно-пневманические прессы, электромагнитные прессы.

Основными технологическими переходами при выполнении заклепочного соединения являются: совмещения отверстий соединяемых деталей, установка заклепки в отверстие с обеспечением перпендикулярного положения ее оси по отношению к плоскости соединяемых деталей, приложение усилий на заклепку по возможности в точно осевом ее направлении. Качество выполнения всех этих переходов будет определять и качество соединения, но только при условии, что форма, материал и точность размеров заклепки, а также толщина соединяемых элементов конструкции выбраны правильно.

Если очевидно, что требуемую тарировку силы удара обеспечить нельзя, то следует ориентироваться на соединение развальцов-

кой. Но и при этом возможны существенно различные усилия на заклепку.

Обычно развальцовку производят на сверлильных или револьверных станках. Усилие нажатия на соединение при развальцовке будет зависеть от рабочего и может меняться в широких пределах. Установка упоров, ограничивающих подачу инструмента, не всегда может дать желаемые результаты, так как колебания размеров толщин соединяемых элементов конструкции и длины заклепок, как правило, приводят к существенным различиям в условиях, которым подвергаются в таком случае место соединения, а следовательно, и элементы конструкций. В результате либо соединение получается слабым, либо относительно хрупкие неметаллические части конструктивных элементов растрескиваются.

Иногда одновременно с развальцовкой производится и расчеканка бортов заклепок (или втулок). Этот технологический прием, обеспечивающий хорошее непроворачивающееся соединение втулок, вместе с тем всегда сопровождается большими усилиями на соединение. Большие уровни местных усилий на элементы конструкции не позволяют использовать этот технологический прием для соединения хрупких деталей (керамических, изготовленных из термореактивных пластмасс или гетинакса). Как бы тщательно ни выполнялся процесс склепывания, развальцовки или расчеканки, он не может обеспечить такого качества соединения, которое бы предотвращало возможные сдвиги элементов конструкции при приложении к ним сравнительно небольших касательных усилий. Величины возможных взаимных перемещений будут определяться степенью деформации соединяемых металлических элементов конструкции. Когда один из этих элементов не деформируется, например, при использовании керамики, то соединение допускает любое перемещение одной части по отношению к другой. Поэтому ограничение взаимного перемещения соединяемых частей конструкции может обеспечиваться только соответствующим выбором конструкции соединения.

Технологический процесс склепывания в значительной степени определяет точность взаимного расположения соединяемых элементов конструкций. Это вытекает из особенностей самого процесса, поскольку для его осуществления обязательно требуется обеспечение свободного перемещения одной соединяемой части по отношению к другой. Зазоры между поверхностями отверстий и заклепками позволяют в процессе клепки в определенных пределах ориентировать соединяемые части конструкции, что обеспечивает требуемую точность их взаимного расположения. Часто в процессе

клепки точность взаимного расположения элементов конструкции может быть достигнута большей, чем конструктивными мерами. В отдельных же случаях единственным способом обеспечения требуемой точности взаимного расположения элементов конструкции может быть соответствующий технологический процесс.

Однако точность, получаемая в технологическом процессе, находится в прямой зависимости от точности элементов соединяемых деталей. Поэтому здесь следует иметь в виду, что технологический процесс повышает возможную точность взаимного расположения соединяемых деталей, доводя ее до требуемой величины, а не полностью ее определяет.

С другой стороны, в процессе соединения клепкой, развальцовкой или расчеканкой точность взаимного расположения элементов конструкции может быть получена ниже точности, предопределяемой конструкцией. Это может быть следствием неточной фиксации соединяемых частей конструкции или отсутствия такой фиксации. Могут быть случаи, когда в процессе соединения принимаются соответствующие меры для обеспечения правильного взаимного расположения частей конструкции, а требуемая точность все же не получается. Это может иметь место, как при использовании неточных приспособлений, так и при неправильном их использовании или при нарушениях всего технологического процесса соединения.

Недостаточно качественные приспособления и неправильно выполняемый технологический процесс могут не только приводить к плохому соединению, но и портить отдельные элементы конструкций. Ранее уже отмечалось, что чрезмерное усилие при развальцовке или чрезмерно большие силы ударов при клепке и расчеканке могут приводить к появлению трещин или откалыванию отдельных частей от относительно хрупких материалов соединяемых элементов конструкций. Кроме того, в процессе соединения могут иметь место искажения формы элементов конструкции или повреждения их поверхностей.

Итак, резюмируя влияние технологических процессов, применяющихся при соединении клепкой, развальцовкой и расчеканкой, на качество соединения, можно отметить следующее:

1) качество соединения клепкой, развальцовкой или расчеканкой не всегда может быть установлено внешним осмотром, что часто приводит к проникновению скрытых дефектов в готовую продукцию;

2) качество рассматриваемых соединений во многом зависит от качества выполнения технологического процесса и его оснастки (инструмента, приспособления и оборудования);

3) точность взаимного расположения элементов конструкций в большей степени определяется технологическим процессом выполнения соединения и в особенности точностью используемых приспособлений;

4) качество соединения, которое может быть обеспечено в процессе его технологического выполнения, зависит от того, насколько хорошо учитываются особенности конструкции и технологии.

Для получения качественной клепки и замыкающей заклепки используют специальные обжимки (рис. 120) с различными формами рабочих поверхностей. Для сферических и овальных головок обжимка (рис. 120,*а*) имеет на рабочем торце овальную лунку, соответствующую форме замыкающей головки. Для образования плоских и потайных головок применяют обжимки *2* с плоским торцом; для пустотелых головок – обжимки *3* специального профиля. Рабочие поверхности обжимок полируют; изготовляют их из инструментальных сталей У7 У8, Х12Ф1 и твердых сплавов ВК10–ВК16.

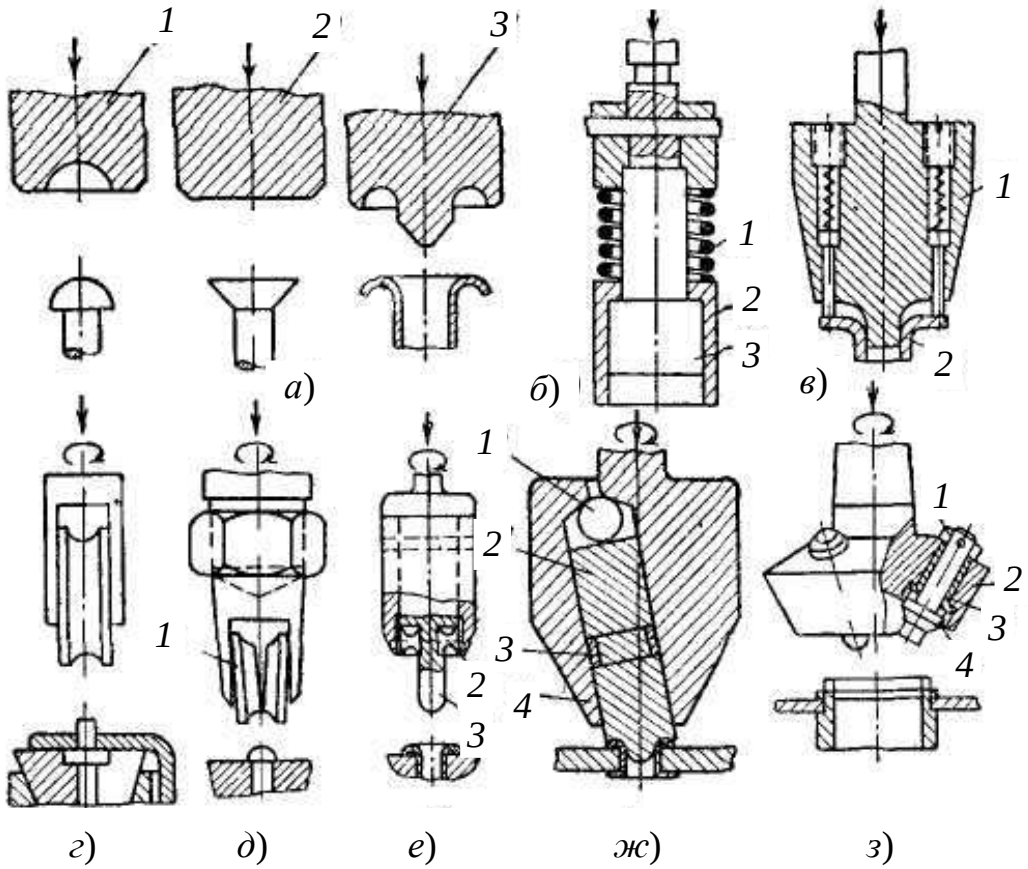


Рис. 120. Обжимки для клепки

Для более точной клепки применяют обжимки (рис. 120,*в*), обеспечивающие сжатие пакета и имеющие дополнительно прижимной буфер *2*, подпертый пружиной (или пружинами) *1*. Буфер свободно скользит по стержню *3* обжимки и во время рабочего хода сжимает пакет до того, как стержень коснется заклепки.

В ряде случаев при клепке деталей в соединениях из хрупких материалов используют обкатывающий инструмент, в котором трение скольжения заменено трением качения (рис. 120,*г*). При этом существенно улучшаются условия деформирования металла заклепок, чистота поверхности головок, значительно увеличивается стойкость инструмента. Качество клепки в еще большей степени улучшается, если использовать инструмент, показанный на рис. 120,*д*, который представляет собой оправку с двумя роликами *1*, расположенными под небольшим углом друг к другу.

6.3.4. Соединения с помощью цапф (выступов)

Цапфой называется выступ одной детали, который используется для соединения с другой (рис. 121).

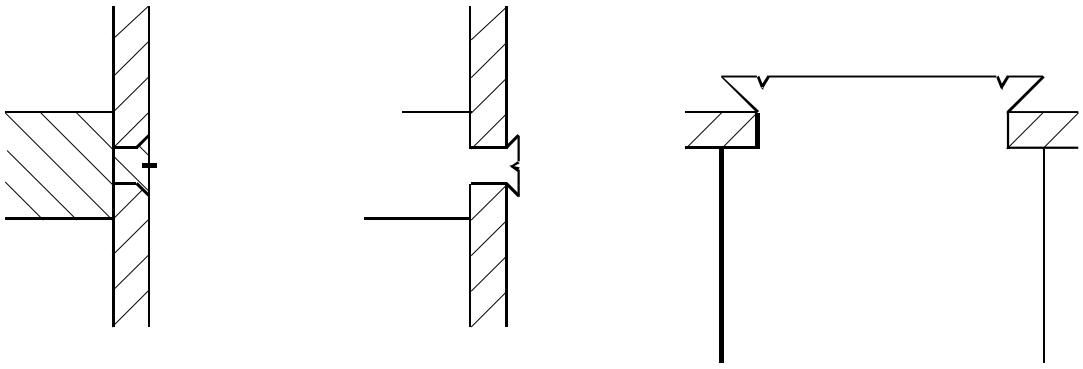


Рис. 121. Соединение с помощью цапф

Соединение деталей может производиться склепыванием или развальцовкой без применения заклепок, используя выступ на одной из деталей.

Технологические приемы, используемые при соединениях цапфами, могут быть следующие: склепывание, развальцовка, расчеканка, расклепывание ударами керна или специальной оправкой, расклепывание оправкой с прямоугольными зубцами, осаживанием.

6.3.5. Соединения с помощью запрессовки

Запрессовка осуществляется следующим образом: деталь или какая-то ее часть вставляется в отверстие другой, причем для получения прочного соединения отверстие берется меньшего размера, чем вставлявшаяся в него деталь. Это соединение с натягом.

Натяг посадки равен сумме абсолютных значений деформаций охватываемой и охватывающей деталей.

В производстве РЭС различают геометрическую и физическую точность. Геометрическая точность определяет соответствие формы, размеров и размерных соотношений, заданных рабочим чертежом. Физическая точность определяет степень соответствия физических параметров готового элемента требуемым величинам.

Запрессовкой достигается напряженное состояние материала в месте соединения, при этом материал детали должен деформироваться, но не разрушаться. Запрессовкой возможно соединение только пластичных материалов, для симметрии усилий, а также из соображений экономичности изготовления сопрягаемые поверхности деталей, соединяемых запрессовкой, должны иметь цилиндрическую форму. Запрессовываемая деталь имеет форму цилиндрического стержня с диаметром $d_{\text{в}}$, а вторая деталь – цилиндрическое отверстие диаметром $d_{\text{отв}}$. Применяются два вида соединений запрессовки.

1. Одновременная вставка и запрессовка, при этом $d_{\text{в}} > d_{\text{отв}}$. В этом случае необходим так называемый разжимающий конус. При отсутствии разжимающего конуса будет иметь место прошивка отверстия, и напряженное состояние материала, необходимое для соединения, не возникает.

2. Вставка с последующим осаживанием ударами, в результате которых возникает напряженное состояние материала в месте соединения.

Соединение запрессовкой (рис. 122) применяется для крепления втулок с шестернями, запрессовки кернов в оси. Глубина отверстия h, $h = 4 - 7d_a$, диаметр отверстия d_a на 0,3–0,4 мм меньше $d_{\text{в}}$. Для более твердых и менее пластичных материалов натяг при запрессовке должен быть меньше, следовательно, класс точности изготовления детали выше. Поэтому запрессовка стальной втулки на стальную ось дороже, чем латунной втулки на стальную ось.

Наиболее точных посадок требуют детали из эбонита, который в холодном состоянии неэластичен.

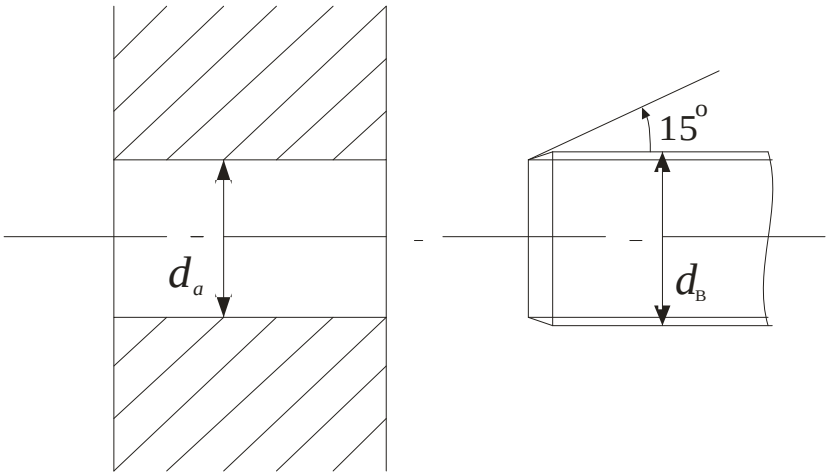


Рис. 122. Соединение запрессовкой

В радиоэлектронике преобладают малые диаметры. Запрессовка при малых диаметрах требует изготовления деталей с высокой степенью точности, что значительно удорожает стоимость соединения, для удешевления соединения в таких случаях применяют накатку. Запрессовываемая деталь накатывается специальным инструментом, т.е. ей придают рифленую поверхность, увеличивающую диаметр, но обладающую незначительной твердостью.

При накатке диаметр детали вследствие выдавливания материала увеличивается, что разрешает изготовлять детали не с натягом, а с зазором и с меньшей точностью. Зазор при этом должен с избытком перекрываться увеличением диаметра при накатке. Если поперечное сечение охватываемой детали может быть выполнено по закону архимедовой спирали на протяжении полного оборота, то отверстие в охватывающей штампованной детали также удобно выполнить по архимедовой спирали несколько большего радиуса. Соединение таких деталей осуществляется простым заклиниванием при повороте на угол γ после вставки. Угол подъема спирали выбирается меньшим угла трения между материалами соединяемых деталей, чем обеспечивается невозможность саморазъединения при тряских и ударах. Запрессовка применяется также для соединения неметаллических деталей с металлическими. Примером могут служить эбонитовые рукоятки, изолированные зажимы, грибки для

надписей, а также изоляционные втулки для прохождения проводником через металлические панели и перегородки. Если цилиндрическая деталь, соединяемая запрессовкой с кольцом, не может быть выполнена с высокой степенью точности, которая требуется при напряженных посадках, применяют упругие посадки колец со сдавливаемыми проушинами. Примером такого соединения является соединение керамической трубки непроволочного сопротивления с металлическим кольцом из полосового материала для подвода тока и крепления.

6.4. Виды неисправностей радиоэлектронных средств и методы их устранения

Современные РЭС представляют собой сложное устройство, состоящее из совокупности элементов, составляющих определенное множество. Под элементами, принадлежащими множеству, понимается микросхема, электрорадиоэлемент (ЭРЭ), перемычка, пайка и т.д. – все, от чего зависят исправность и работоспособность РЭС.

РЭС можно представить в виде «черного ящика», на входы которого поступают информация и напряжение питания, а на выходе появляется информация в виде электрического сигнала, звука, изображения и т.д.

Неисправность РЭС проявляется в виде искажения выходной информации или ее отсутствия (при наличии входного сигнала и напряжения питания). Источником неисправности могут быть один или несколько элементов, а также внешние воздействия и факторы, не входящие в множество элементов РЭС – пыль, влага, застывшие капли припоя и т.д. Неисправные элементы РЭС называются дефектными элементами. Каждый элемент (деталь) РЭС оказывает влияние на формирование выходных параметров. Зависимость между состояниями элементов РЭС и ее выходными параметрами носит неоднозначный характер: большинство элементов влияет сразу на несколько параметров, а сами параметры могут зависеть от многих элементов. Например, конденсатор сглаживающего фильтра служит для уменьшения пульсаций в блоке питания монитора. При появлении волнообразных искажений краев растра можно сделать вывод, что пульсация напряжения питания возросла из-за уменьшения емкости конденсатора фильтра. Но к такому же внешнему проявлению приводят и другие дефекты, увеличивающие пульсацию

(выход из строя стабилитрона в стабилизаторе напряжения, возрастание тока нагрузки и пр.).

Недостаток подобного подхода заключается в том, что он учитывает ухудшение элементов лишь в количественном отношении (уменьшение емкости), не принимая во внимание качественные изменения (появление проводимости у конденсаторов). Количественные изменения характеристик элементов могут приводить к различным внешним проявлениям. Влияние дефектного элемента одновременно на несколько выходных параметров РЭС в ряде случаев облегчает нахождение неисправности.

Работу РЭС можно оценивать различными показателями:

- физическим состоянием элементов (оценивается внешним осмотром);
- качеством выдаваемой информации;
- формой и значением напряжений в различных точках (оцениваются по показаниям измерительных приборов).

Начинать поиск неисправностей необходимо с обнаружения существенных противоречий в этих показателях. На определении этих противоречий основаны все методы поиска неисправностей. Следует иметь в виду, что ремонт РЭС состоит не только в определении и устранении неисправности, но и в выполнении этой задачи в кратчайший срок минимальными средствами: рабочего времени, комплектующих деталей, вспомогательных материалов и т.п.

Неоправданным можно считать ремонт РЭС в следующих случаях:

- РЭС морально устарело, для него уже не выпускают запасные детали, а установка нетиповых деталей требует значительных затрат времени, доработки конструкции и пр.;
- РЭС физически устарело, в нем заметно проявляются процессы старения материалов, снижение диэлектрических показателей изолирующих материалов: старение паек, высыхание оксидных конденсаторов и пр.;
- РЭС имело механические повреждения в результате удара, падения или подвергалось химическим воздействиям (попадание морской воды внутрь корпуса и др.).

При замене той или иной детали нередко одновременно проводят замену прилегающих к ней соединительных элементов и обновляют пайки. Например, при замене интегральной схемы (ИС) одновременно обновляются и пайки ее выводов. При этом возможны следующие варианты:

- дефектной была ИС, и после ее замены неисправность устранена;
- ИС была исправна, а дефектными были пайки ее выводов, и в процессе замены ИС дефект устранен;
- при замене ИС из-за небрежной пайки на ПП образовалась перемычка из припоя между выводами ИС, что привело к дополнительной неисправности.

6.4.1. Классификация дефектов радиоэлектронных средств

От характера дефектов во многом зависят особенности их поиска. В первую очередь необходимо выяснить, имеется ли вообще неисправность (неправильная установка устройств регулировки, переключателей и т.п.). Поэтому важно определить, к какому типу относится данный дефект. Классификация дефектов по признакам может ускорить определение неисправности и соответственно сократить время, затрачиваемое на ремонт.

Все дефекты, встречающиеся в РЭС, можно классифицировать по признакам: трудоемкости обнаружения; сложности; количеству; степени связанности; скорости проявления; особенности проявления; месту нахождения дефекта в одной из подсистем РЭС; внешнему проявлению; источнику неисправности; причинам возникновения; значимости. Это разделение условное, так как сами признаки не могут иметь четких границ. Например, одна и та же неисправность может иметь сразу несколько признаков.

По трудоемкости обнаружения различают дефекты: очевидные, на поиск которых затрачивается мало времени; типовые, имеющие однозначную связь с их внешним проявлением; нетиповые, на поиск которых затрачивается больше времени.

По сложности обнаружения различают дефекты: простые, когда дефект очевиден и легко устраним; несложные, когда дефект легко отыскивается, однако устранение его затруднено (замена вышедшей из строя печатной платы); сложные, когда дефект непросто отыскать, но легко устранить (плохая пайка, в которой контакт нарушается лишь с прогревом изделия; микроперемычки на печатной плате из-за действия агрессивной среды); очень сложные, когда дефект трудно отыскать и устранить (случайные межэлектродные замыкания).

По количеству различают дефекты одиночные и групповые, когда несколько неисправностей проявляются одновременно.

По степени связанности дефекты разделяют на независимые и коррелированные, причем корреляция может быть вызвана причинами неисправности как самого изделия, так и условиями эксплуатации.

По скорости проявления дефекты бывают внезапные и постепенные.

По особенностям проявления различают дефекты: постоянно проявляющиеся; непостоянные, проявляющиеся время от времени без явных причин; проявляющиеся или пропадающие в процессе прогрева (в первом случае дефект отыскивается методом электропрогона, а во втором – РЭС дают остыть и обнаруживают дефект сразу после включения); проявляющиеся или пропадающие при механических воздействиях (при простукивании, прижатии стенок или крышки, вращении органов управления и т.п.); самоустраняющиеся.

По местонахождению дефекты разделяются на дефекты подсистемы обработки входной информации, дефекты подсистемы формирования выходной информации, дефекты системы питания.

По внешнему проявлению различают дефекты, связанные с отсутствием какого-либо параметра РЭС; с несоответствием какого-либо параметра норме; с появлением на выходе нежелательных сигналов.

По источнику неисправность может быть вызвана выходом из строя одной или нескольких деталей: резисторов, предохранителей, разъемных соединителей, переключателей, конденсаторов, моточных изделий, диодов, транзисторов, микросхем, кинескопа, а также печатного и объемного монтажа.

По причинам возникновения дефекты бывают случайные или детерминированные, т.е. вполне определенные, которые можно предусмотреть. К детерминированным дефектам относятся:

- недостатки конструкции, заложенные при ее разработке: малонадежные элементы; элементы, эксплуатирующиеся в режимах, близких к предельно допустимым (статистика ремонтов показывает, что в первую очередь в РЭС выходят из строя радиоэлементы, работающие при напряжениях, приближающихся к предельным); конструктивные решения, не обеспечивающие надежность контактных соединений или, наоборот, вызывающие нежелательные связи (блочно-модульный принцип построения современной РЭС при всех его достоинствах существенно увеличивает число разъемных соединений, а недостаточная надежность механических контактов повышает вероятность их отказов);

• нарушение технологической дисциплины при изготовлении РЭС (непропаи, качество монтажа и т.п.);

• нарушение условий эксплуатации: эксплуатация РЭС под действием прямых солнечных лучей, вблизи отопительных приборов или с закрытыми вентиляционными отверстиями;

• использование не предназначенных для данного РЭС предохранителей;

• неосторожное обращение с РЭС, повлекшее к падению, ударам; попадание внутрь РЭС влаги, пыли, насекомых, посторонних предметов (при эксплуатации в условиях повышенной влажности чаще всего выходят из строя элементы, работающие в высоковольтных цепях);

• воздействие статического электричества, которое образуется на коврах, одежде из синтетических материалов и пр.;

• намагничивание маски и бандажа кинескопа от воздействия близко работающих электробытовых приборов; неправильное подключение РЭС к источнику питания;

• механические повреждения по вине обслуживающего персонала (особое внимание следует уделять установочным переменным резисторам, которые могут быть неправильно установлены или повреждены из-за применения неподходящей отвертки, а также из-за излишнего усилия при регулировке, могут быть повреждены печатные проводники в местах установки переменных резисторов, переключателей и т.п.);

• неквалифицированное вмешательство в конструкцию РЭС: перепутаны цоколевки установленных элементов, впаяны транзисторы другого типа, установлены дефектные элементы; произведены плохие пайки, замкнуты или оборваны проводники; плохо установлены или перепутаны соединители; изъяты лишние крепежные детали, экраны, проводники соединения с шасси; несанкционированное изменение электрической и монтажной схем.

Неквалифицированное вмешательство можно обнаружить при осмотре монтажа. Его признаками являются: нетиповые элементы, плохая пайка, нарушение стопорящей краски на подстроенных и регулировочных элементах, нарушение заводских пломб, нарушение герметизации и т.п.

Любой дефект, проявляющийся в РЭС, нарушает ее нормальную работу. Однако дефекты неравноценны, поэтому целесообразно установить последовательность их поиска и устранения, исходя из значимости.

6.4.2. Испытания радиоэлектронных средств. Испытания как основная форма контроля

Согласно ГОСТ 16.504–74 испытания – это экспериментальное определение количественных или качественных характеристик свойств объекта:

- как результата воздействия на него;
- при его функционировании;
- при моделировании объекта и (или) воздействий.

Испытания осуществляются по заданным программам, их можно рассматривать как часть технического контроля. Для проведения испытаний используются средства испытаний, т.е. изделия или нештучная продукция, применяемые для осуществления испытаний. В качестве средств испытаний могут использоваться испытательные стенды, которые представляют собой техническое устройство для установки объекта испытаний в заданных положениях, создания воздействий, съема информации и осуществления управления процессом испытаний и (или) объектом испытаний. Испытания проводятся на испытательных полигонах, т.е. в местах, предназначенных для проведения испытаний в условиях, близких к условиям эксплуатации, и обеспеченных необходимыми средствами испытаний.

Классификацию видов испытаний удобно произвести по назначению, условиям и режиму, видам воздействия на объект испытаний (табл. 36), месту в процессе разработки и производства.

Таблица 36

Классификация видов испытания

Виды испытаний	Основной вид воздействия
1	2
Механические испытания	Механические нагрузки (вибрации, удары, линейные ускорения)
Акустические испытания	Акустические колебания
Климатические испытания	Климатические факторы (тепло, холод, влажность, воздействие воды: дождь, снег, иней и т.д.)
Гидравлические (пневматические испытания)	Давление жидкости или газа

Окончание табл. 36

1	2
Электрические испытания	Электрические нагрузки
Магнитные испытания	Магнитное поле
Электромагнитные испытания	Электромагнитное поле
Радиационные испытания	Ионизирующие излучения (нейтроны, γ-излучения)
Биологические испытания	Жизнедеятельность организмов
Химические испытания	Химическая реакция

По назначению различают испытания: исследовательские, контрольные, определительные, доводочные, аттестационные.

Исследовательские испытания проводятся для измерения определенных свойств объекта.

Контрольные испытания – испытания объекта, проводимые для контроля его качества.

Определительные испытания – для определения значений параметров продукции с заданными значениями точности и доверительной вероятности.

Доводочные испытания проводятся в процессе разработки продукции для оценки влияния вносимых в нее изменений с целью достижения требуемых показателей качества.

Аттестационные испытания – испытания, проводимые для оценки уровня качества продукции при ее аттестации.

По условиям и режиму различают следующие основные виды испытаний (рис. 123): нормальные, ускоренные (форсированные, сокращенные), разрушающие, неразрушающие.

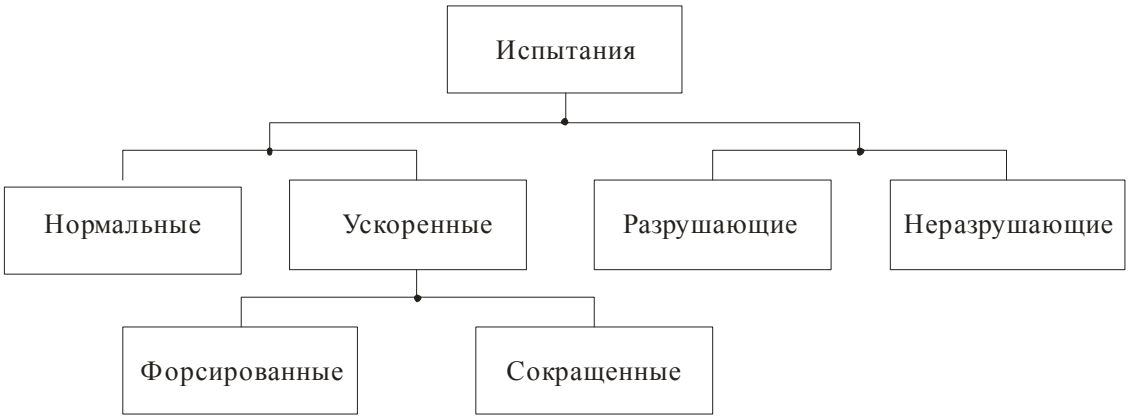


Рис. 123. Классификация видов испытаний

Нормальные испытания – испытания продукции, методы и условия, проведение которых обеспечивает получение необходимого объема информации в такой же срок, как и в предусмотренных условиях и режимах эксплуатации.

Ускоренные испытания – испытания продукции, методы и условия, проведение которых обеспечивает получение необходимого объема информации в более короткий срок, чем в предусмотренных условиях и режимах эксплуатации. Ускоренные испытания могут быть форсированными или сокращенными (форсированные испытания, основанные на интенсификации процессов, вызывающих отказы или повреждения; сокращенные испытания – ускоренные испытания без интенсификации процессов, вызывающих отказы или повреждения).

Разрушающие испытания – испытания продукции, которые могут нарушить ее пригодность к использованию по назначению.

Неразрушающие испытания – испытания продукции, которые должны не нарушать ее пригодность к использованию по назначению.

При оценке влияния тех или иных воздействий различают устойчивость и прочность по отношению к воздействующему фактору.

Под устойчивостью к воздействующему фактору понимают способность изделия выполнять свои функции и сохранять параметры в заданных пределах в условиях воздействия данного фактора.

Под прочностью понимают способность изделия противостоять разрушающему действию механических нагрузок, выполнять свои функции и сохранять параметры в заданных пределах после окончания действия нагрузок.

Классификация испытаний по видам воздействий.

Отдельный важный вид испытаний составляют испытания на надежность, которые могут быть контрольными и определительными, нормальными и ускоренными.

Поскольку надежность есть комплексное свойство, то различают испытания на безотказность, долговечность (ресурсные испытания), ремонтопригодность и сохраняемость.

Классификация испытаний по месту в процессе разработки и производства приведена на рис. 124.

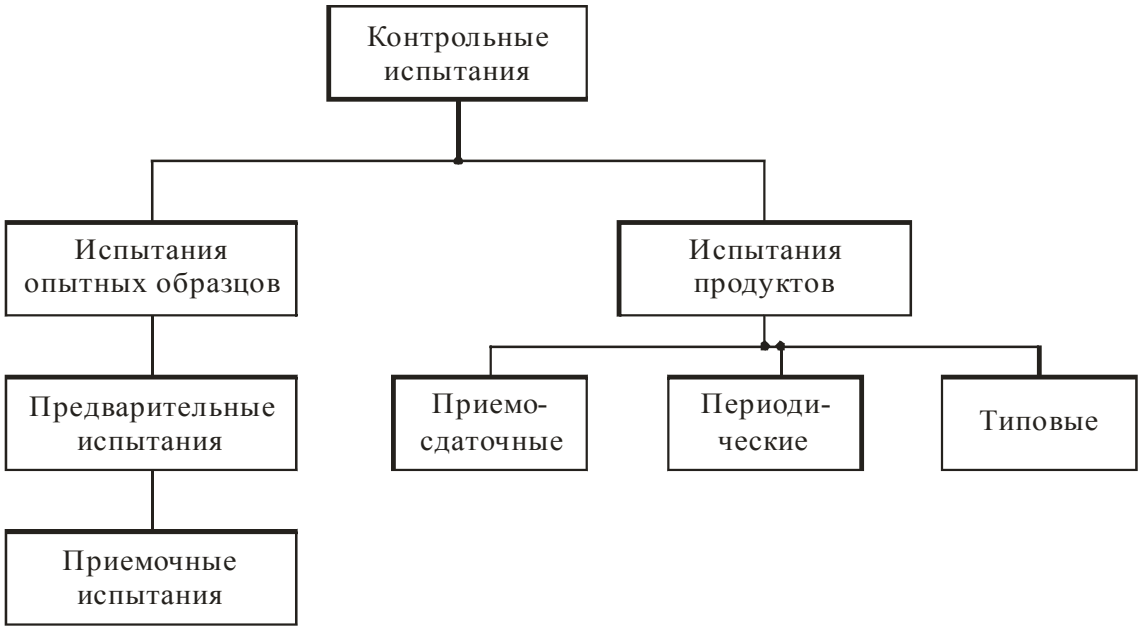


Рис. 124. Классификация испытаний по месту в процессе разработки и производства

Предварительные испытания – контрольные испытания опытных образцов (партий) продукции, проводимые для определения возможности их предъявления на приемочные испытания.

Приемочные испытания – контрольные испытания опытных образцов (партий) продукции, а также изделий единичного производства, проводимые для решения вопроса о целесообразности постановки на производство этой продукции или передаче ее в эксплуатацию. Основной документ – программа испытаний и техническое задание.

В зависимости от степени важности продукции приемочные испытания бывают ведомственными, межведомственными и государственными.

Ведомственные испытания проводит комиссия из представителей заинтересованного министерства или ведомства.

Межведомственные испытания проводит комиссия из представителей нескольких заинтересованных министерств и ведомств.

Государственные испытания – приемочные испытания, проводимые государственной комиссией.

Приемосдаточные испытания – контрольные испытания готовой продукции, проводимые при приемочном контроле.

Периодические испытания – контрольные испытания продукции, проводимые периодически в объемах и сроках, установленных соответствующей документацией.

Типовые испытания – контрольные испытания продукции, проводимые после внесения изменений в конструкцию, рецептуру или технологию изготовления для оценки эффективности и целесообразности внесенных изменений.

Испытания РЭС представляют собой экспериментальное определение при различных воздействиях количественных и качественных характеристик изделий при их функционировании. При этом как сами испытываемые изделия, так и воздействия могут быть смоделированы. Цели испытаний различны на различных этапах проектирования и изготовления РЭС. К основным целям испытания, общим для всех видов РЭС, можно отнести:

- выбор оптимальных конструктивно-технологических решений при создании новых изделий;
- доводку изделий до необходимого уровня качества;
- объективную оценку качества изделий при их постановке на производство, в процессе производства и при техническом обслуживании;
- гарантирование качества изделий при международном товарообмене.

Испытания служат эффективным средством повышения качества, так как позволяют выявить:

- недостатки конструкции и технологии изготовления РЭС, приводящие к срыву выполнения заданных функций в условиях эксплуатации;
- отклонения от выбранной конструкции или принятой технологии, допущенные в производстве;
- скрытые случайные дефекты материалов и элементов конструкции, не поддающиеся обнаружению существующими методами технического контроля;
- резервы повышения качества и надежности разрабатываемого конструктивно-технологического варианта изделия. По результатам испытаний изделий в производстве разработчик РЭС устанавливает причины снижения качества. Если эти причины установить не удается, совершенствуют методы и средства контроля изделий и ТП их изготовления.

Для повышения качества выпускаемых РЭС на конечных операциях ТП их изготовления проводят предварительные испытания, позволяющие выявить изделия со скрытыми дефектами. Режимы

этих испытаний выбирают такими, чтобы они обеспечивали отказы изделий, содержащих скрытые дефекты и в то же время не вырабатывали ресурса тех изделий, которые не содержат дефектов, вызывающих при эксплуатации отказы. Эти испытания часто называют *технологическими тренировками* (термотоковая тренировка, электротренировка, тренировка термоциклами и др.).

Программа и методы проведения испытаний определяются конкретным видом и назначением РЭС, а также условиями эксплуатации. Для контроля качества и приемки изделий устанавливают основные категории контрольных испытаний, оговоренные в ТУ: *приемосдаточные, периодические, типовые, предъявительские.*

Каждая категория испытаний может включать несколько видов испытаний (электрические, механические, климатические, на надежность и др.) и видов контроля (визуальный, инструментальный и др.). В зависимости от особенностей эксплуатации и назначения изделий, а также специфики их производства некоторые виды испытаний выделяют в отдельные категории испытаний (на надежность – безотказность, долговечность, сохраняемость и др.). Виды испытаний и контроля, последовательность проведения, проверяемые параметры и их значения устанавливаются в ТУ (стандартах, программах, методиках и др.).

Во время испытаний применяют сплошной или выборочный контроль по ТУ и плану контроля. Результаты испытаний считаются отрицательными, если обнаружено несоответствие изделия хотя бы одному требованию ТУ для проводимой категории испытаний. Применяемые средства испытаний, измерения и контроля, а также методики измерений должны соответствовать требованиям метрологического обеспечения. Запрещается использовать средства испытаний, не прошедшие метрологическую аттестацию.

Приемосдаточные испытания (ПСИ). Эти испытания проводят для контроля изделия на соответствие требованиям ТУ, установленным для данной категории испытаний. На ПСИ изделия предъявляют поштучно. Испытания и приемку проводит представитель заказчика в присутствии представителя отдела технического контроля (ОТК) предприятия-изготовителя в объеме и последовательности, предусмотренными в ТУ на изделие. О готовности изделия к ПСИ предприятие-изготовитель уведомляет представителя заказчика извещением, оформленным в установленном порядке. К извещению прикладываются протоколы технологической трени-

ровки и предъявительских испытаний, выполненных по форме, принятой на предприятии-изготовителе.

Рассмотрим в качестве примера протокол проведения ПСИ для самолетной аппаратуры:

1) контроль проведения технологической тренировки (проверка наличия протокола тренировки);

2) проверка комплектности и качества эксплуатационной документации;

3) проверка маркировки;

4) проверка изделия на соответствие требованиям конструкторской документации;

5) проверка покупных изделий и материалов на срок службы и срок сохраняемости;

6) проверка переходного сопротивления;

7) проверка электрической прочности изоляции;

8) проверка электрического сопротивления изоляции;

9) испытание на прочность при воздействии синусоидальной вибрации одной частоты;

10) проверка потребляемых токов;

11) проверка при изменении напряжения питания;

12) проверка запаса регулировки;

13) испытание на взаимозаменяемость составных частей;

14) испытание на воздействие акустического шума;

15) испытание на устойчивость к воздействию синусоидальной вибрации;

16) проверка массы;

17) проверка качества упаковки.

Состав и последовательность проведения испытаний могут быть изменены по согласованию с представителем заказчика. Принятыми считаются изделия, выдержавшие испытания, укомплектованные и упакованные в соответствии с ТУ.

Периодические испытания. Такие испытания проводят с целью:

- периодического контроля качества изделий;
- контроля стабильности ТП в период между испытаниями;

• подтверждения возможности продолжения изготовления изделий по действующим конструкторской и технологической документации, ТУ и приемки.

Календарные сроки испытаний устанавливаются в графике, составленном предприятием-изготовителем с участием представителя заказчика. Периодическим испытаниям подвергается одно изделие ежегодно. Результаты испытаний оформляются актом, к которому прилагается протокол, выполненный по форме, принятой на предприятии-изготовителе.

Состав и последовательность периодических испытаний следующий (пример для самолетной аппаратуры):

1) проверка взаимозаменяемости составных частей;

2) проверка времени готовности;

3) испытание на непрерывную работу;

4) испытание по обследованию резонансов конструкции;

5) испытание на прочность при воздействии синусоидальной вибрации;

6) испытание на устойчивость при воздействии синусоидальных вибраций;

7) испытание на устойчивость к воздействию линейных ускорений;

8) испытание на прочность при транспортировании в запакованном виде;

9) испытание на воздействие повышенной влажности;

10) испытание на воздействие пониженной и предельно пониженной температуры среды;

11) испытание на воздействие повышенной и предельно повышенной температуры среды;

12) испытание на воздействие циклического изменения температуры среды от предельно пониженной до предельно повышенной;

13) испытание на воздействие пониженного атмосферного давления;

14) испытание на воздействие изменения атмосферного давления;

15) испытание на герметичность;

16) испытание на безотказность;

17) испытание на воздействие акустического шума.

Состав и последовательность проведения испытаний могут быть изменены по согласованию с представителем заказчика.

Если изделие выдержало периодические испытания, то его производство продолжается до следующего срока испытаний. Если изделие не выдержало периодических испытаний, то приемку изделий и отгрузку принятых изделий приостанавливают до выявления и устранения причин возникновения дефектов и получения положительных результатов повторных испытаний.

Типовые испытания проводят для изделий прерывистого производства (единичного и мелкосерийного прерывистого производства) для оценки эффективности и целесообразности предлагающихся изменений в изделие или технологию его изготовления, которые могут изменить технические и другие характеристики изделия и его эксплуатацию. Испытания проводят на изделиях, в которые внесены предлагающиеся изменения, по программе и методике необходимых испытаний из состава приемосдаточных и периодических.

Если эффективность и целесообразность предлагаемых изменений подтверждаются результатами типовых испытаний, то их вносят в соответствующую документацию на изделие в соответствии с требованиями государственных стандартов.

Предъявительские испытания (ПИ). Перед предъявлением изделий на испытания и приемку представитель заказчика ОТК проводит предъявительские испытания готовых изделий. Такие испытания проводятся с целью контроля изделий на соответствие требованиям ТУ и готовности для предъявления заказчику. Как правило, их проводят в объеме не менее приемосдаточных испытаний, но планы контроля и нормы на проверяемые параметры могут устанавливаться более жесткими. Документация по испытаниям согласуется с заказчиком.

Кроме перечисленных выше основных категорий испытаний, существуют *квалификационные испытания* по приемке установочной серии, *испытания на долговечность* и *проверочные испытания* (проводится научно-исследовательской организацией заказчика).

Основным организационно-методическим документом при испытаниях РЭС является программа испытаний. Она регламентирует цели испытаний, объем и методику проводимых исследований; порядок, условия, место и сроки проведения испытаний; ответст-

венность за обеспечение и проведение испытаний; ответственность за оформление протоколов и отчетов.

Общие цели контрольных, сравнительных и определительных испытаний, общие положения об испытаниях на воздействие механических и климатических факторов конкретизированы в государственных стандартах. В программе испытаний в краткой форме излагается информация об объекте испытания (срок его изготовления, номер паспорта, особенность конструкции и технологии изготовления и т.п.), а также параметры, подлежащие прямому или косвенному измерению, критерии годности изделия РЭС, требования к внешнему виду и электрические параметры. В разделах программы испытаний указывают объем и методику испытаний, в которых даются сведения о количестве испытываемых изделий, общей продолжительности испытаний при различных воздействующих факторах, о периодичности, составе и последовательности испытаний, о параметрах испытательных режимов, пределах изменения питающих напряжений и продолжительности работы РЭС при этих напряжениях и т.п.

В плане испытаний указывают необходимые работы, такие как изготовление образцов, их приемка ОТК, измерение и определение параметров, подготовка испытательного оборудования, проведение испытаний, оформление результатов, согласование и утверждение протокола испытаний и т.п.

Вторым организационно-методическим документом является методика испытаний РЭС. В ней излагаются: метод, средства и условия испытаний, алгоритмы выполнения операции по определению одной или нескольких взаимосвязанных характеристик свойств объекта, формы представления данных и методы оценивания точности, достоверности результатов, требования техники безопасности и охраны окружающей среды. Основным требованием к методике является обеспечение максимальной эффективности процесса испытаний и минимально возможные погрешности полученных результатов. Она включает требования к методу и условиям испытаний и техническим средствам. Методика испытаний должна содержать описание следующих этапов процесса испытаний: проверки испытательного оборудования, подготовки испытываемых изделии, совместной проверки испытательного оборудования и испытуемого изделия, регистрации результатов испытаний и данных об условиях их проведения.

Испытание на воздействие внешних факторов предназначено для определения с некоторой долей вероятности способности изде-

лий сохранять работоспособность и параметры в заданных условиях окружающей среды путем имитации реальных условий окружающей среды или путем воспроизведения их воздействий.

Когда возникает необходимость в проведении испытаний РЭС межнационального использования на воздействие внешних факторов, следует пользоваться методами испытаний, указанными в СТ МЭК 68-2, за исключением тех случаев, когда соответствующий метод испытаний отсутствует. Для этого имеются следующие основания:

а) полное соответствие с методами испытания СТ МЭК 68-2, что необходимо для обеспечения повторяемости и воспроизводимости результатов;

б) испытания СТ МЭК 68-2 подходят для применения к разнообразным образцам. Они разработаны независимо от вида испытуемого образца. Образец может не быть электротехническим изделием;

в) результаты, полученные в различных лабораториях, могут быть сопоставимы;

г) исключается распространение мало отличающихся друг от друга методов испытаний и оборудования;

д) длительное использование одного и того же испытания позволяет сравнивать результаты предыдущих испытаний образцов, технические характеристики которых в условиях эксплуатации известны.

Испытания характеризуют посредством задания параметров испытательных режимов, а не описанием испытательных средств. Для некоторых испытаний необходимо описать оборудование.

Выбирая метод испытания, который следует применять, разработчик нормативно-технологической документации (НТД) должен всегда учитывать экономические аспекты, в частности, когда существуют два различных испытания, по результатам которых может быть получена одинаковая заданная информация.

Если при раздельном последовательном воздействии двух или более внешних факторов не обеспечивается получение желаемой информации, следует воспользоваться комбинированными или составными испытаниями. Самые важные комбинированные и составные испытания даны в СТ МЭК 68-2.

В соответствии с государственным стандартом механические и климатические испытания проводят с целью проверки соответст-

вия изделий РЭС требованиям, установленным в ТЗ, стандартах и ТУ на изделия конкретных классов и типов. Испытаниям подвергается РЭС или отдельные ее части, число которых устанавливают в ТУ на изделия и в программе испытаний. Перечень испытаний, рекомендуемых при разработке, освоении и серийном производстве, приведен в табл. 37. Виды механических испытаний обозначены номерами 101–114, климатических – 201–220, 301 и 302, испытания на соответствие конструктивно-технологическим требованиям – 401–412.

Таблица 37

Перечень испытаний

Номер испытания	Вид испытания	Необходимость проведения испытаний	
		на опытных образцах, образцах из установочной серии, а также на изделиях серийного производства в случае изменений их конструкции	на изделиях серийного производства, проверяемых периодически, кроме изделий серийного производства, в случае изменения их конструкции
1	2	3	4
100	Испытание по определению резонансных частот конструкции.		
101	Испытание на проверку отсутствия резонансных частот конструкции в заданном диапазоне.		
102	Испытание на устойчивость при воздействии синусоидальной или широкополосной случайной вибрации (испытание на виброустойчивость).	+ +	н
103	Испытание на прочность при воздействии синусоидальной или широкополосной случайной вибрации длительное (испытание на вибропрочность длительное).	+	н
103	Испытание на прочность при воздействии синусоидальной вибрации кратковременное (испытание на	–	н

	вибропрочность кратковременное).		

Продолжение табл. 37

1	2	3	4
104	Испытание на прочность при воздействии механических ударов многократного действия (испытание на ударную прочность).	+	н
105	Испытание на устойчивость при воздействии механических ударов многократного действия (испытание на ударную устойчивость).	+	н
106	Испытание на воздействие механических ударов одиночного действия испытание на воздействие одиночных ударов)	+	н
202	Испытание на воздействие повышенной предельной температуры среды.	+	–
203	Испытание на воздействие пониженной рабочей температуры среды.	+	+
204	Испытание на воздействие пониженной предельной температуры среды.	+	–
205	Испытание на воздействие изменения температуры среды.	+	н
206	Испытание на воздействие инея и росы.	+	–
207	Испытание на воздействие повышенной влажности воздуха, длительное или ускоренное.	+	н
208	Испытание на воздействие повышенной влажности воздуха кратковременное.	н	н
209	Испытание на воздействие атмосферного пониженного давления.	+	н
210	Испытание на воздействие повышенного давления.	+	н
211	Испытание на воздействие солнечного излучения.	+	–
212	Испытание на воздействие динамической пыли (песка).	+	–
213	Испытание на воздействие статической пыли (песка).	+	–
214	Испытание на воздействие инея и росы ускоренное.	+	–
215	Испытание на воздействие статического гидравлического давления.	+	н
216	Испытание на водонепроницаемость.	+	н
217	Испытание на воздействие дождя.	+	–
218	Испытание на каплезащищенность.	+	–
219	Испытание на водозащищенность.	+	н

220	Испытание на воздействие агрессивных сред (сернистого газа или серо-водорода, озона)	**	–

Окончание табл.37

1	2	3	4
301	Испытание на воздействие сред заполнения	н	+
401	Испытание на герметичность.	+	н
402	Испытание на способность к пайке.	+	н
403	Испытание на теплостойкость при пайке.	+	н
404	Проверка соответствия габаритным, установочным и присоединительным размерам.	+	+
405	Проверка внешнего вида.	+	+
406	Проверка массы.	+	+
407	Контроль качества маркировки.	+	+
408	Испытание упаковки на прочность.	+	+
409	Испытание на пожарную безопасность.	н	–
410	Испытание на взрывозащищенность.	н	–
411	Испытание на воздействие очищающих растворителей.	+	–
412	Испытание на паяемость, растворение металлизации и теплостойкость при пайке изделий для поверхностного монтажа	+	н

П р и м е ч а н и е. «+» – испытания проводят, если соответствующие требования установлены в ПИ и ТУ на изделие; «–» – испытания не проводят; н – испытания проводят, если это предусмотрено в ПИ и ТУ на изделие; * – испытания проводят один раз при разработке изделия, а также при изменении конструкции, если это применение влияет на значение резонансных частот; ** – испытание проводят один раз при разработке изделий, а также при изменении конструкции, технологии или материалов, если эти изменения влияют на характеристики изделий, определяющие их стойкость к данному воздействию (условия не относятся к испытаниям на воздействие сернистого газа или сероводорода).

Все испытания проводят в нормальных климатических условиях, которые характеризуются следующими значениями параметров:

- температура воздуха – 15–35 °С;
- относительная влажность воздуха – 45–80 %;
- атмосферное давление – 84–106 кПа (630–800 мм рт. ст.).

Испытания последовательно включают в себя начальную стабилизацию (если требуется); начальную проверку и измерения (если требуется); выдержку; конечную стабилизацию (если требу-

ется); заключительные проверки и измерения (если требуется).

Рассмотрим особенности проведения основных испытаний.

6.4.3. Испытания радиоэлектронных средств на механические воздействия

Все механические испытания РЭС проводят в нормальных климатических условиях под электрической нагрузкой или без нее или в условиях испытаний, указанных в государственных стандартах. Повышение температуры окружающего воздуха при испытаниях за счет выделения тепла испытательным стендом и изделием допускается при условии, что она не будет превышать верхнее значение повышенной рабочей температуры среды, указанной в стандартах и ТУ на изделия и ПИ, при этом допускается обдув стендов.

Изделия, имеющие собственные амортизаторы, если не оговорено методиками стандарта, должны крепиться на амортизаторах. Если в стандарте и ТУ на изделие предусмотрены различные способы крепления при эксплуатации, то изделие испытывают при одном наиболее опасном способе крепления, указанном в стандарте. По согласованию с заказчиком допускается применение способов крепления, отличных от способов крепления при эксплуатации, если это обеспечивает эффективный контроль стабильности производства и выявление устойчивости изделий к соответствующему виду механических воздействий. При этом способ крепления однотипных изделий должен быть единым и указываться в технической документации на изделие. Время выдержки в заданном режиме отсчитывают, как правило, с момента достижения параметров испытательного режима.

Наибольшее влияние на РЭС оказывает сочетание вибрационных нагрузок и одиночных ударов. Поэтому испытания на указанные воздействия проводят в первую очередь. Испытания на остальные механические воздействия являются дополнительными. Так, испытания на воздействие акустических шумов позволяют выявить дефекты РЭС, которые не удается обнаружить при воздействии вибрации из-за влияния амортизирующих свойств конструкции изделия и его крепления.

Испытания по определению резонансных частот конструкции допускается проводить на отдельных типах (типоразмерах, типономиналах) изделий, имеющих одинаковую конструкцию. При этом

резонансные частоты конструкции изделий, не подвергнутых данному испытанию, определяют расчетным или графическим путем.

Испытание на проверку отсутствия резонансных частот конструкции изделия в заданном диапазоне частот при определении соответствия изделий заданным требованиям не проводят, если соответствие изделий требованиям по отсутствию резонансных частот в заданном диапазоне частот обеспечивается их конструкцией, о чем должно быть указано в стандартах и ТУ на изделия и ПИ.

Испытание на проверку отсутствия резонансных частот конструкции изделий в заданном диапазоне частот допускается совмещать с испытанием на *виброустойчивость*. Испытание на виброустойчивость не проводят, если низшая резонансная частота изделия превышает 2 $f_в$, где $f_в$ – верхняя частота диапазона испытаний, а конструкция и технология изделий исключают нарушение работоспособности при действии вибрации. Кроме того, испытания на виброустойчивость не проводят у изделий, параметры которых по конструкции и принципу работы не зависят от воздействия вибрации, о чем должно быть указано в стандартах и ТУ на изделия. Виброустойчивость этих изделий обеспечивается их конструкцией.

Испытание на виброустойчивость допускается совмещать с испытанием на *вибропрочность*, проводя его в начале и (или) в конце испытаний на вибропрочность, о чем должно быть указано в стандартах и ТУ на изделия и ПИ. При этом скорость изменения частоты вибрации должна обеспечивать проверку и регистрацию параметров изделия, контролируемых в процессе испытания на виброустойчивость, и не должна превышать одной октавы в минуту. Общее время испытаний определяют временем испытаний на вибропрочность.

Испытание на вибропрочность и виброустойчивость при воздействии синусоидальной вибрации в диапазоне частот ниже 10 Гц и испытание на вибропрочность и виброустойчивость при воздействии широкополосной случайной вибрации в диапазоне частот ниже 20 Гц не проводят, если низшая резонансная частота изделия превышает 25 Гц, при этом прочность и (или) устойчивость изделий указанных ниже частот обеспечиваются их конструкцией. Испытание на вибропрочность и виброустойчивость в диапазоне частот до 5000 Гц проводят только для изделий миниатюрных и сверхминиатюрных конструкций с массой не более 20 г. В остальных случаях вместо диапазона частот до 5000 Гц допускается проводить испытания до 2000 Гц. При этом прочность и устойчивость

изделий к воздействию синусоидальной или широкополосной случайной вибрации в поддиапазоне частот 2000–5000 Гц обеспечиваются конструкцией изделий.

При наличии требований по прочности и (или) устойчивости к воздействию широкополосной случайной вибрации изделия, имеющего четыре или более резонансов в рабочем диапазоне частот, испытывают на воздействие широкополосной случайной вибрации; изделия, имеющие менее четырех резонансов в рабочем диапазоне частот, испытывают на воздействие синусоидальной вибрации.

Испытаниям на ударную устойчивость не подвергают изделия, у которых низшая резонансная частота превышает 2000 Гц, а конструкция и технология изготовления изделий исключают нарушение работоспособности при действии ударных нагрузок. Кроме того, испытание на ударную устойчивость не проводят у изделий, параметры которых по конструкции и принципу работы не зависят от воздействия ударов, о чем должно быть указано в стандартах и ТУ на изделия.

Испытаниям на ударную прочность не подвергают изделия, у которых низшая резонансная частота превышает 1000 Гц. Ударная прочность и (или) устойчивость таких изделий обеспечиваются их конструкцией.

Испытание на ударную устойчивость рекомендуется совмещать с испытанием на ударную прочность, проводя его в конце испытаний на ударную прочность в каждом направлении воздействия.

Проверку параметров перед испытанием на вибропрочность (ударную прочность) не проводят, если перерыв между окончанием испытания на устойчивость и началом испытания на прочность не превышает 24 ч.

При отсутствии технической возможности проведения испытаний на вибропрочность и ударную прочность на отдельных изделиях допускается проведение испытания изделий в составе конкретного объекта. Испытания на вибропрочность и на ударную прочность на стадии серийного производства не проводят, если в состав испытаний на безотказность, проводимых регулярно с такой же периодичностью, входят испытания на воздействие вибрации и ударов с теми же значениями характеристик.

Испытание на прочность или устойчивость при воздействии линейного ускорения не проводят, если предусмотрено испытание на воздействие ударов одиночного или многократного действия с

ускорением, равным или большим, чем линейное. Прочность и (или) устойчивость таких изделий к воздействию линейного ускорения обеспечиваются их конструкцией. Данное требование не распространяется на изделия, имеющие в своей конструкции подвижные детали (например, роторы электродвигателей, не имеющие дополнительных устройств ограничения перемещения в зазоре).

При испытании на линейное ускорение 5000 м/с^2 (500 g) и выше допускается понижение давления окружающего воздуха до значения, характерного для данной центрифуги, при условии, что давление не будет ниже допускаемого, указанного в стандартах, ТУ на изделия и ПИ.

Испытание на воздействие акустического шума в диапазоне частот ниже 125 Гц не проводят, если в стандартах и ТУ на изделия предусмотрено испытание на воздействие вибрации. При этом стойкость изделий к воздействию акустического шума ниже указанной частоты обеспечивается их конструкцией.

Испытанию на воздействие акустического шума не подвергают изделия, удовлетворяющие одному или нескольким из следующих условий:

1) в ТЗ или стандартах и ТУ на изделия указаны уровни воздействующего акустического давления 130 дБ и менее;

2) изделия не содержат внутренних полостей (например, трансформаторы, дроссели, модули и микромодули, залитые компаундом; постоянные резисторы, конденсаторы постоянной емкости и т.п.);

3) низшая резонансная частота конструкции изделия превышает верхнюю частоту диапазона частот испытаний на воздействие акустического шума при условии, что конструкция и ТП изготовления изделий исключают возникновение нарушений их работоспособности, не связанных с влиянием резонансов (наличие посторонних частиц и т.п.);

4) параметры изделий по конструкции и принципу работы изделий не зависят от воздействия акустического шума, о чем должно быть указано в стандартах и ТУ на изделия.

Стойкость этих изделий к воздействию акустического шума обеспечивается конструкцией.

Если изделия не содержат в конструкции деталей, соединяемых путем сборочных операций (например, безвыводные конденсаторы и резисторы, бескорпусные транзисторы, не имеющие выво-

дов), то испытания таких изделий на воздействие механических факторов допускается не проводить, что устанавливается в стандартах и ТУ на изделия по согласованию с заказчиком. При этом прочность и (или) устойчивость к механическим воздействиям обеспечиваются конструкцией изделия.

Параметры испытательных режимов при механических испытаниях должны устанавливаться по показаниям рабочих средств измерения в контрольной точке.

При испытаниях на вибрационные и ударные воздействия контрольную точку выбирают в одном из следующих мест:

- на платформе стенда рядом с одной из точек крепления изделия, если последнее крепится непосредственно на платформе;
- на крепежном приспособлении, если изделие крепится на приспособлении;
- рядом с точкой крепления амортизатора, если изделие крепится на собственных амортизаторах.

Допускается выбор контрольной точки на платформе стенда, если средства крепления обеспечивают передачу механических воздействий от платформы стенда к приспособлению с минимальными искажениями, при этом отклонения ускорения на приспособлении в месте его крепления не должны превышать ±25 % значения ускорения в контрольной точке. Допускается по согласованию с заказчиком выбирать контрольную точку непосредственно на изделии при условии, что масса изделия не менее чем в 10 раз превышает массу измерительного преобразователя и жесткость изделия обеспечивает контроль с заданной точностью параметров воздействия.

При испытании на воздействие вибрации крупногабаритных изделий (любой из габаритных размеров больше 300 мм) рекомендуется за значение ускорения в контрольной точке принимать среднее арифметическое значение показаний нескольких измерительных преобразователей, установленных на столе вибростенда или приспособлении рядом с точками крепления изделий. Расположение контрольной точки указывают в стандартах и ТУ на изделия, ПИ или в НТД на приспособления.

Жесткость монтажных плат и крепежных приспособлений должна обеспечивать передачу механических воздействий к испытываемым изделиям с минимальными искажениями. При необходимости в стандартах и ТУ на изделия и ПИ следует приводить чертежи монтажных плат и крепежных приспособлений, применяе-

мых при испытании. Для изделий, предназначенных для работы в сочлененном состоянии, необходимость испытания в этом состоянии указывают в стандартах и ТУ на изделия и ПИ. Изделия, предназначенные для применения в микромодулях, испытывают в составе условного микромодуля, если другие условия не указаны в стандартах и ТУ на изделия и ПИ. Если масса, габаритные размеры и конструкция изделий не позволяют испытывать их в полном комплекте, то осуществляют испытания отдельного блока. Если последовательность испытания блоков не позволяет проверять соответствие изделий требованиям ТЗ или стандартов и ТУ на изделия, то испытания электрически связанных между собой блоков проводят одновременно при размещении их в нескольких камерах или на нескольких стендах. Изделия, состоящие из нескольких блоков (узлов), находящихся в неодинаковых условиях эксплуатации, испытывают раздельно по нормам, соответствующим условиям эксплуатации этих блоков (узлов).

Если масса и габаритные размеры изделия не позволяют провести его испытания на существующем оборудовании и изделие после изготовления не может быть разобрано на блоки, то такие изделия оцениваются по специальной программе, согласованной с заказчиком.

При испытании изделий с собственными амортизаторами на устойчивость и прочность при воздействии синусоидальной или широкополосной случайной вибрации в диапазоне частот 0,7–1,4 от резонансной частоты колебаний изделий на амортизаторах допускается:

- уменьшать амплитуду перемещения или ускорения таким образом, чтобы ускорение, воздействующее на само изделие, установленное на амортизаторах, соответствовало требованиям, предъявляемым к изделию в целом. В этом случае контрольную точку располагают на изделии и ее положение указывают в стандартах и ТУ на изделия и ПИ;
- испытывать изделия без амортизаторов (с отключенными амортизаторами) по нормам, предъявляемым к изделию.

По согласованию с заказчиком при наличии в изделии элементов на подвеске допускается уменьшать амплитуду ускорения или исключать испытание изделия на резонансных частотах элементов на упругой подвеске, если в стандартах и ТУ на изделия указаны резонансные частоты этих элементов.

Применяемые виды механических испытаний и их последовательность указываются в ПИ и зависят от назначения РЭС, условий эксплуатации, типа производства. Например, в программу определительных испытаний опытного образца и образцов установочной серии обычно включают все виды механических испытаний, а для образцов, изготовляемых в серийном производстве, – только испытания, предусмотренные в стандартах и ТУ на РЭС.

Надежная работа РЭС обеспечивается за счет конструктивных запасов по вибропрочности, виброустойчивости, резонансной частоте и другим характеристикам. Конструктивный запас РЭС по резонансной частоте оценивается коэффициентом конструктивного запаса

$$K_{з} = f_{н} / f_{в},$$

где $f_{н}$ – наименьшая резонансная частота испытываемого изделия; $f_{в}$ – верхняя частота рабочего диапазона, заданная в НТД. Из формулы видно, что чем выше наименьшая резонансная частота, тем больше $K_{з}$ и, следовательно, выше вибропрочность при равных рабочих условиях.

Внешние механические воздействия подробно рассмотрены в гл. 2, а методы испытаний – в ГОСТах.

6.4.4. Испытание радиоэлектронных средств на климатические воздействия

Испытание РЭС (изделия) на воздействие климатических факторов проводят для проверки способности изделий выполнять свои функции, сохранять параметры и (или) внешний вид в пределах установленных норм при воздействии климатических факторов. Для воспроизводимости результатов испытания необходимо его полное и точное описание, исключающее всякую неопределенность толкования. Исходя из этого в НТД принята такая последовательность операций (этапов) испытания РЭС на климатические воздействия: предварительная выдержка изделий (стабилизация их свойств); первоначальные измерения параметров и внешний осмотр; установка изделий в камеры и выдержка их в условиях испытательного режима; извлечение из камер и выдержка для восстановления свойств изделий (конечная стабилизация свойств); внешний осмотр и заключительные измерения параметров изделий.

Предварительную выдержку проводят с целью полного или частичного устранения последствий воздействия на изделия в предыдущих условиях эксплуатации. Изделия выдерживают, как правило, в нормальных климатических условиях. Выдержку изделий, на результаты измерения параметров которых может существенно влиять относительная влажность, выполняют в условиях, обеспечивающих воспроизводимую толщину влаги, адсорбированной на поверхности изделий. Эти условия предусматривают строгое поддержание температуры (допустимое отклонение ±1 °С) при относительной влажности 73–77 %. Продолжительность предварительной выдержки определяется временем, достаточным для установления теплового равновесия изделий с окружающей средой. Обычно оно не превышает 2 ч. Первоначальные и заключительные измерения параметров изделий рекомендуется проводить при одних и тех же значениях температуры и влажности окружающей среды.

При установке изделий в камере климатических испытаний необходимо следить за тем, чтобы между изделиями и стенками камеры, а также между самими изделиями свободно циркулировал воздух. Способ установки и положение изделий при испытании имеют важное значение для воспроизводимости его результатов. Если при эксплуатации возможно несколько вариантов положения изделия, то следует выбрать вариант, обеспечивающий наибольшую жесткость испытания. Если в процессе испытания электрическая нагрузка на РЭС не подается, изделия располагают на сетках из капроновых нитей, натянутых на опоры. При испытании с электрической нагрузкой изделия устанавливают на специальных платах, приспособлениях (кассетах, держателях, контактирующих устройствах). Металлические части приспособлений обязательно должны иметь антикоррозионные покрытия. Время выдержки в испытательном режиме отсчитывают с момента установления режима в камере. Это время при повышенной (пониженной) температуре должно быть достаточным для прогрева (охлаждения) изделий по всему объему.

Изделия в выключенном состоянии считаются достигшими температуры окружающей среды (теплового равновесия), если температура самых массивных частей (или других частей, указанных в ПИ и ТУ), определяющих прогрев по всему объему, отличается от температуры окружающей среды не более чем на ±3 °С. Время прогрева (охлаждения) изделий по всему объему устанавливают на этапе предварительных испытаний с помощью датчиков для кон-

троля температуры. Допускается не контролировать температуру частей аппаратуры, если эти части не имеют защиты, предназначенной для теплоизоляции. В этом случае изделие в зависимости от массы выдерживают для достижения температуры окружающей среды: 2 ч – при массе изделия не более 2 кг; 3 ч – 2–10 кг; 4 ч – 10–20 кг; 6 ч – 20–50 кг; 8 ч – 50–100 кг; 10 ч – 100–300 кг. Требования к объему камеры в зависимости от размеров испытываемой аппаратуры и значения теплорассеивания с единицы ее поверхности устанавливают с учетом рекомендаций государственных стандартов.

Подвижные наземные изделия, смонтированные в кузовах автомобилей, прицепов и других средствах передвижения, испытывают вместе со средствами передвижения.

При невозможности измерения параметров изделия без извлечения из испытательной камеры при различных видах испытаний допускается проводить эти измерения вне камеры. Методика и время измерения параметров после извлечения из камеры оговариваются в ПИ и ТУ на изделие.

Воспроизводимость результатов испытания в значительной мере зависит от точности поддержания заданных параметров испытательного режима. Допуски на значения воздействующих факторов выбирают исходя из компромисса между точностью испытания, с одной стороны, и стоимостью его – с другой. При испытании на влагоустойчивость допуски на температуру и относительную влажность воздуха в камере устанавливают равными соответственно ±2 °С и ±3 %. При определении указанных допусков учитывают неравномерность распределения температуры по объему камеры, погрешность измерения ее приборами, а также изменение температуры во времени. При верхнем значении температуры 40 °С и относительной влажности воздуха 90 % изменение температуры на 2 °С приводит к изменению относительной влажности на 9 %. При высокой относительной влажности даже незначительное изменение температуры может привести к выпадению росы (неконтролируемый процесс), что в свою очередь существенно снижает воспроизводимость результатов испытания. Допустимые отклонения воздействующих климатических факторов не должны превышать значений, указанных в табл. 38, если в НТД не указаны иные допускаемые отклонения, обусловленные спецификой эксплуатации изделий.

Таблица 38

Допустимое отклонение воздействующих климатических факторов

Воздействующий фактор	Допустимое отклонение
1	2
Температура, °С:	
–200... –85	±5 °С
–85...+ 100	+2 °С
100...200	±5 °С
свыше 200	±10 °С
Скорость изменения температуры окружающей среды, °С/мин:	
1–5	±20 %
5–10	±50 %
Относительная влажность по ТУ	±3 %
Пониженное давление:	
выше $1{,}33 \cdot 10^2$ Па (1 мм рт. ст.)	±5 % или $1{,}33 \cdot 10^2$Па*
$1{,}33 \cdot 10^2$–1,33 Па (10^2 мм рт. ст.)	+60 %
ниже 1,33 Па	±30 %
Повышенное избыточное давление	±20 %
Солнечное излучение:	
– интегральная плотность потока по ТУ	±10 %
– плотность потока ультрафиолетовой	±25 %
– температура по ТУ, Вт·м$^{-2}$	±40
Интенсивность дождя, кг/м$^{-2}$	± 25
Массовая концентрация пыли по ТУ, г/л$^{-1}$	± 10
Скорость ветра по ТУ, м/с$^{-1}$	±10
Массовая концентрация коррозионно-активных агентов среды по ТУ г/л$^{-1}$	±10

* Допустимое отклонение в паскалях берется в том случае, если оно больше допустимого отклонения в процентах.

Внешний осмотр изделий осуществляют в соответствии с НТД.

Климатические испытания проводят не только на стадии проектирования РЭС, но и в серийном производстве для отбраковки потенциально ненадежных изделий (приемосдаточные испытания) и для контроля стабильности производства (периодические испытания). Режимы и условия испытания РЭС устанавливают в зависи-

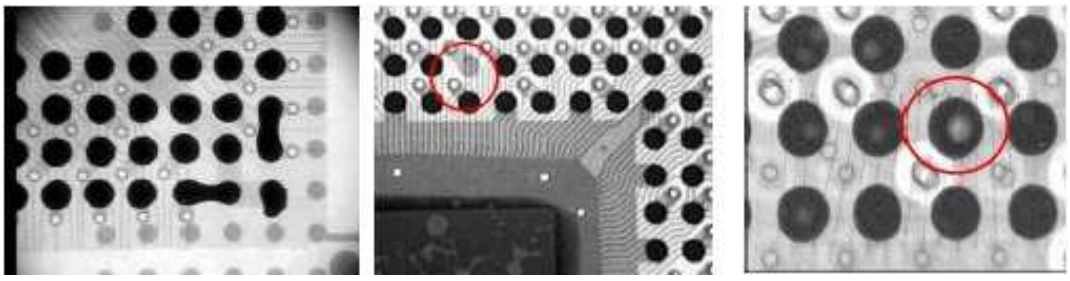
мости от степени жесткости, которая в свою очередь определяется условиями дальнейшей эксплуатации РЭС в составе системы. Изделия считают выдержавшими испытание, если они во время и после его проведения удовлетворяют требованиям, заданным в ПИ и ТУ для данного вида испытаний.

Для повышения информативности и эффективности климатических испытаний при освоении и производстве изделий целесообразно проводить их последовательности, при которых каждое последующее испытание усиливает воздействие предыдущего, которое могло бы остаться незамеченным. Рекомендуется так называемая *нормализованная последовательность климатических испытаний*, включающая испытание при повышенной температуре, кратковременное испытание на влагоустойчивость в циклическом режиме (первый цикл), испытания на воздействия пониженных температуры и атмосферного давления, испытание на влагоустойчивость в циклическом режиме (остальные циклы). При этом между любыми из указанных испытаний допускается перерыв не более 3 сут, за исключением интервала между испытаниями на влагоустойчивость и на воздействие пониженной температуры, который не должен превышать 2 ч. Параметры изделий обычно измеряют в начале и конце нормализованной последовательности.

Методы испытаний подробно описаны в ГОСТе.

6.4.5. Виды дефектов и способы их обнаружения

Для контроля качества пайки BGA при использовании технологии поверхностного монтажа стало широко распространенным использование рентгеновского излучения. Число поставщиков оборудования увеличилось, но средства рентгеновского контроля не продвинулись дальше простых и очевидных дефектов, таких как пропущенные выводы и неуместные пустоты пайки (рис. 125).



«Слияние» «Отсутствующие выводы» «Пустоты пайки»

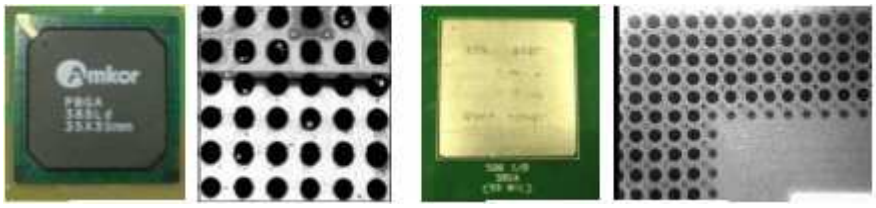
Рис. 125. Основные виды дефектов

Рассмотрим концепцию рентгеновского контроля с «идентификацией подписи» как расширение обычной рентгеновской проверки за рамки набора вышеупомянутых дефектов. Эту своего рода «полноценность» можно достичь, если лучше понять, как рентгеновские изображения связаны с процессами сборки и пайки. Кроме того, идентификация подписи может обеспечивать быструю и эффективную рентгеновскую проверку качества пайки BGA даже при очень скромных затратах на оборудование рентгеновского контроля.

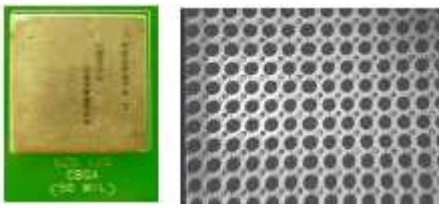
Для понимания рентгеновских снимков надо досконально знать объект изучения. Рассмотрим анатомические особенности, которые следует знать перед изучением рентгеновских изображений.

1. Тип корпуса даст информацию об ожидаемых тепловых эффектах, таких как тепловое расширение, теплоемкость и тенденции к деформации. Если во время пайки что-то пошло не так, то будет отчетливо наблюдаться физическая деформация PBGA (рис. 126).

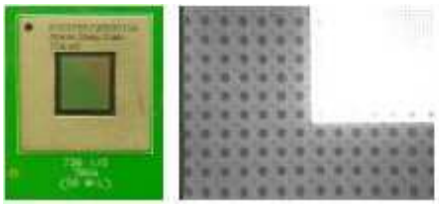
Деформация может быть обнаружена на рентгеновском снимке.



«Plastic BGA» «Super BGA»



«Ceramic BGA»



«Tab BGA»

Рис. 126. Виды физической деформации

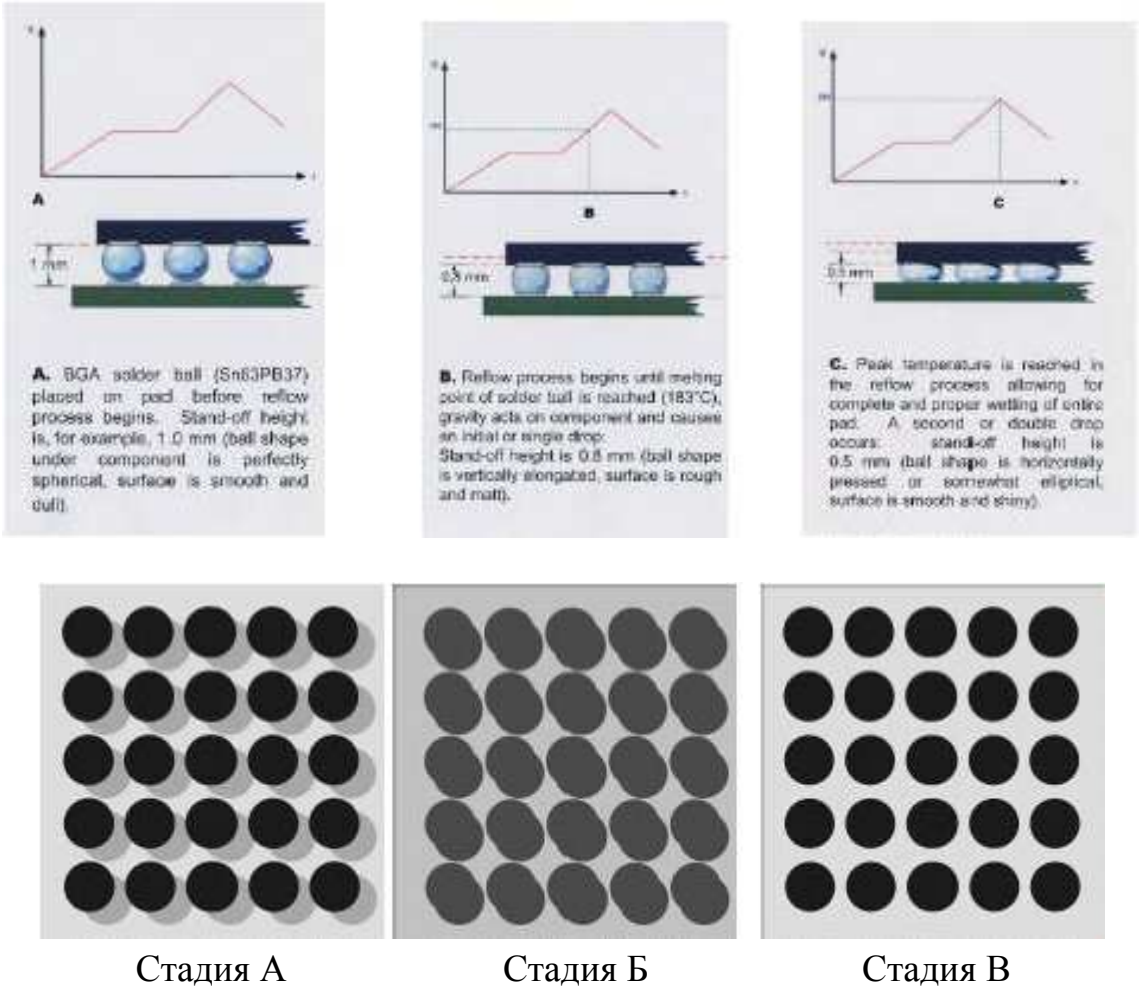
2. Паяльная паста.

Если используется паяльная паста, то могут возникнуть проблемы, связанные с ее избытком или недостатком. Это будет видно на рентгеновском изображении.

3. Конструкция печатной платы.

Платы с высокой теплоемкостью во время пайки могут подвергаться тепловому расширению, что можно наблюдать на рентгеновском снимке.

Автор сделал запись процесса пайки в рентгеновском диапазоне в режиме реального времени. Три стадии пайки показаны на рис. 127.



Стадия А Стадия Б Стадия В

Рис. 127. Основные этапы пайки

Стадия А. В результате размещения компонентов происходит полное или частичное выравнивание BGA относительно выводов платы.

Стадия Б. В течение начального таяния шары припоя начнут смачивать выводы, и только когда все шары расплавятся, корпус будет точно выровнен относительно выводов.

Стадия В. Полное слияние. После выравнивания там, где выводы полностью смочены, может наблюдаться полное слияние.

6.4.6. Описание стадий пайки и их связь с рентгеновскими изображениями

1. На стадии А (предварительный нагрев) зазор между корпусом и платой равен высоте шара, а диаметр рентгеновского изображения шара равен номинальному диаметру шара.

2. На стадии Б (начало слияния) зазор между корпусом и платой составляет около 80 % от начальной высоты шара.

3. На стадии В (полное слияние) зазор между корпусом и платой приближается к 50 % от начальной высоты шара, диаметр рентгеновского изображения шара будет увеличен на 17 %, а площадь увеличится на 37 % от начальной.

Изменение размеров и формы рентгеновских изображений шаров после пайки является ключом к пониманию значения конечного рентгеновского изображения.

Однородность.

На этом этапе можно с уверенностью сказать, что если изображения всех выводов на рентгеновском снимке однородны и являются равными окружностями (допуск 10–15 %), то существует очень хорошая вероятность отсутствия дефектов пайки (рис. 128).

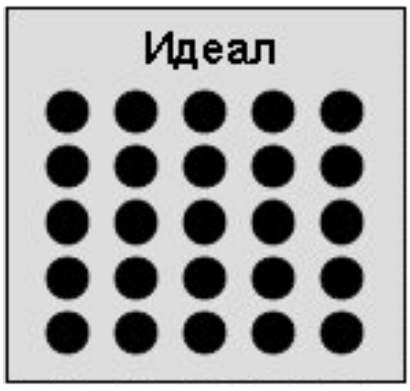


Рис. 128. Однородность пайки BGA

Однородность является первой и наиболее важной характеристикой при использовании рентгеновского контроля, позволяющей быстро квалифицировать качество пайки BGA.

Наличие неоднородностей на рентгеновском изображении BGA может носить как случайный характер, так и иметь вид некоторого образца. И случайный, и шаблонный варианты указывают на возможный дефект или проблему, а также на то, что ее вызвало.

Подписи и их значение.

Поняв это, мы сможем, глядя на некоторые рентгеновские подписи, судить о том, что пошло неправильно в процессе монтажа.

1. Дефекты пайки.

Если качество пайки невысокое, то можно наблюдать большое количество «подписей» (рис. 129). Если BGA после размещения точно не совмещен с выводами, то могут наблюдаться эллиптические соединения. Во время начальной стадии таяния припой будет смачивать вывод, создавая эллиптическое изображение, пока не наступит полное выравнивание.

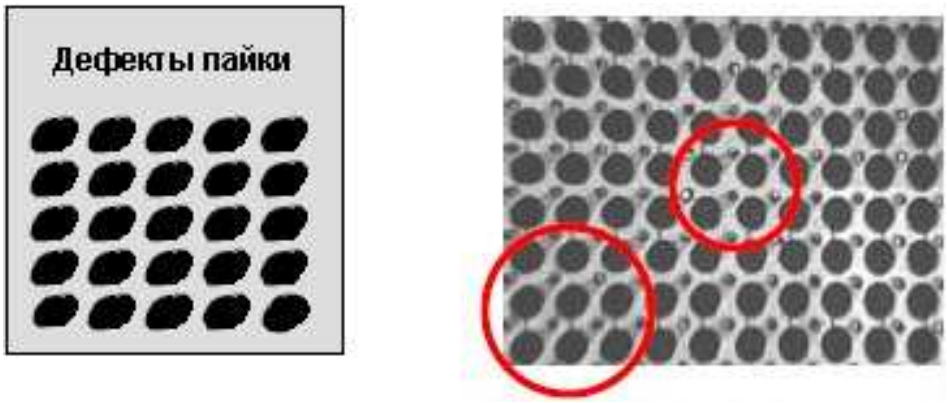


Рис. 129. Дефекты пайки

Если необходимое качество пайки не достигнуто, то полного выравнивания не произойдет и некоторые или даже все изображения окажутся эллиптическими. Эллиптическое изображение наблюдается, когда вывод платы не совмещен с выводом BGA.

2. Соединение холодным припоем.

«Подпись» холодного припоя – это одно из увеличенных изображений соединения с неровными гранями (рис. 130).

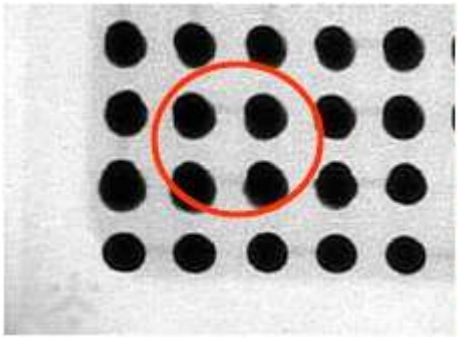


Рис. 130. Холодный припой

3. «Doming» или «dishing» BGA.

«Doming» иногда упоминается как «popcorning», а противоположный эффект «dishing» – как «potato chipping».

Оба этих дефекта вызваны физической деформацией корпуса BGA. Plastic BGA особенно восприимчив к этому состоянию, если влажность не понижена до его размещения.

Подписи, связанные с «doming» и «dishing», показаны на рис. 131. При doming расслаивание происходит под областью кристалла, образуя в центре пластикового корпуса dome, что в свою очередь приводит к сжатию и увеличению шариковых соединений под кристаллом. При «dishing» скручивание граней BGA заставляет соединения по всему периметру тянуться, что делает их более тонкими.



«Popcorning или Doming» Микроскоп «Warpage или Dishing»

Рис. 131. Выводы, достигшие максимума далеко от корпуса

4. Случайные различия в областях соединений.

Когда наблюдается подпись случайных различий в областях соединений, полученных методом шариковой термокомпрессии, детальное рассмотрение обычно показывает наличие пустот пайки в равномерно распределенном припое.

Теперь пустоты пайки легко выявляет рентгеновский контроль, и они классифицируются без ясного понимания как дефекты. Однако последовательное изучение этого явления показало, что некоторые пустоты пайки фактически улучшают надежность соединения. Возник вопрос: какой уровень отсутствия припоя является приемлемым? Эта проблема затрагивается в стандарте IPC Standard 7095 «Проект и выполнение процесса сборки BGA». В этом стандарте есть предостережение относительно тенденции преувеличивать или искажать размер пустот при использовании многих из коммерческих рентгеновских инспекционных систем. Это искажение произойдет, только если устройство рентгенографии, использованное в инспекционной системе, не распознает «Voltage Blooming». Не все устройства рентгенографии показывают такой voltage blooming (рис. 132).

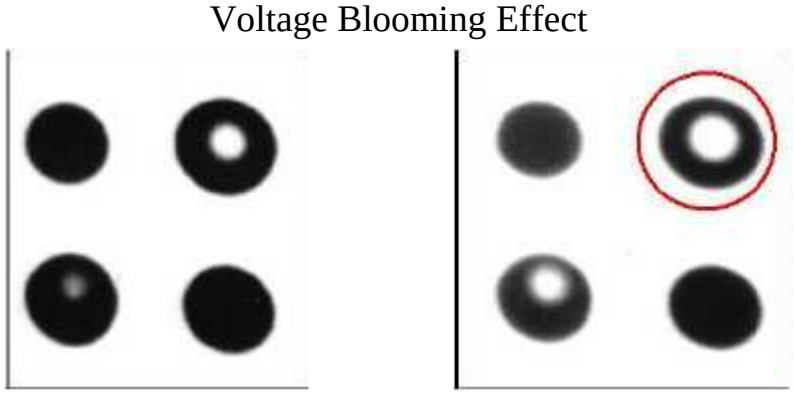


Рис. 132. Пример voltage blooming

Как эффективно использовать концепцию BGA-подписей.

Использование BGA-подписей может обеспечивать быструю и эффективную рентгеновскую проверку качества пайки BGA даже при очень скромных затратах на оборудование рентгеновского контроля.

Системы рентгеновского контроля могут подразделяться на оборудование, предназначенное для использования в условиях производства и/или в лабораториях.

При использовании концепции «подписей» на производстве обычно используют 40-кратное увеличение изображения. В лабораторных условиях, где необходима точность, а не быстрота, используется 1000-кратное и более увеличение.

Использование компьютерной обработки изображений при «идентификации подписей».

Использование идентификации подписей приводит к обнаружению рентгеновских изображений пайки соединений с отличием более чем 15 % от номинального диаметра соединения. Эти отличия могут быть обнаружены оператором, однако компьютерная обработка изображений может более быстро высветить и пометить «подписи» отличий (рис. 133).

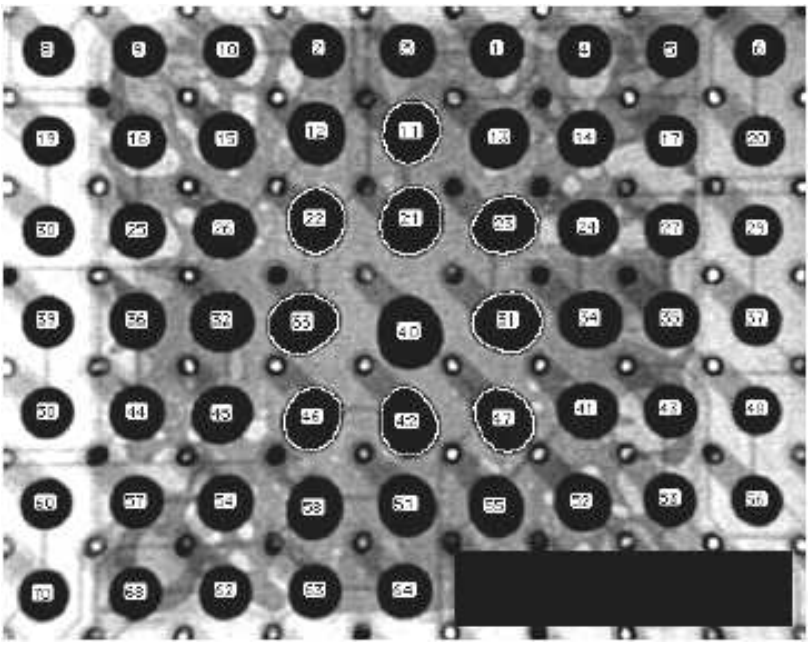


Рис. 133. Пример обработанного изображения
с помеченными «подписями»

Подпись идентифицирована, что дальше?

Если подпись идентифицирована, то это не обязательно подразумевает наличие дефекта и точно не определяет его причину. Однако это означает, что проблема в процессе пайки существует и, в конечном счете, может привести к дефекту. Возвращаясь к аналогии из медицины, если рентгеновские изображения подозрительны, то надо прибегнуть к другому методу. Наиболее эффективная методика определения возникших проблем прибегает к использованию микроскопического оптического зонда, называемого «эндоскопом». Коммерчески доступно множество проектов эндоскопов, которые выполняют оптическое увеличение видеоизображения пайки выводов, как показано на рис. 134.

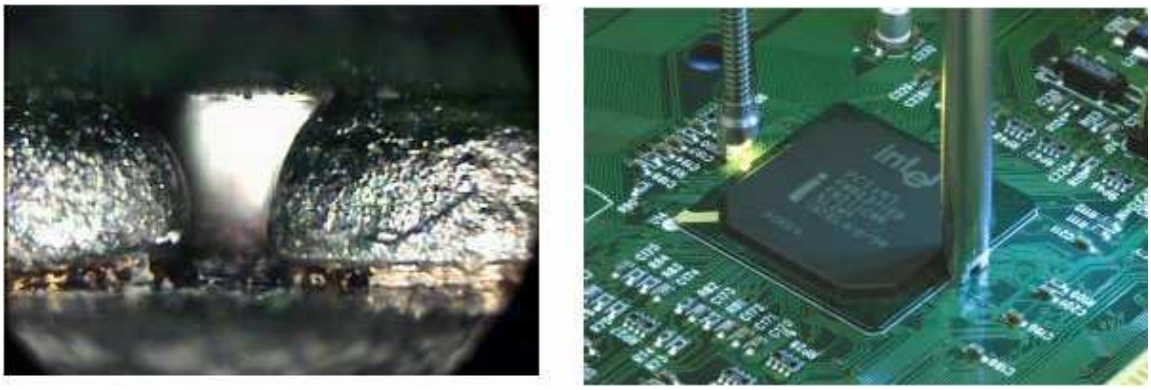


Рис. 134. Эндоскопический осмотр

Эндоскопический осмотр как второй метод

Эндоскопический осмотр соединения BGA является важным дополнением рентгеновского контроля качества пайки.

Эндоскопический осмотр, например, может точно определять соединения холодным припоем, плохой контакт, трещины и остатки флюса.

Недостатком такого контроля является то, что процедура осмотра зачастую оказывается громоздкой и требует много времени.

Однако когда он используется вместе с рентгеновским контролем реального времени с идентификацией подписи, то это становится эффективным средством осмотра пайки BGA, Flip Chips и Chip Scale Packages. Дело в том, что рентгеновская инспекция с использованием идентификации подписи очень быстро квалифицирует соединение BGA как приемлемое или подозрительное. Подозрительные соединения могут быть проверены автономно с использованием эндоскопа для установления точной причины неоднородности пайки. Знание причины может способствовать соответствующей коррекции процесса.

Хотя рентгеновский контроль широко используется при проверке качества пайки установленных элементов с корпусом BGA, вся выгода не может быть полностью осознана, пока не используется идентификация подписи. Понимание значения рентгеновских подписей сделает процесс более быстрым и качественным.

6.5. Непаяные соединения, выполняемые запрессовкой – новый класс соединений на российском рынке электронной техники

Непаяное соединение, выполняемое запрессовкой, – это получаемое запрессовкой соединение между особым образом спрофилированным контактом и сквозным металлизированным отверстием в печатной плате. Оно принадлежит к категории неразъемных соединений, образующихся за счет холодной деформации фрагментов соединяемых элементов и существующих в самых разнообразных вариациях. Высокие механические и электрические характеристики достигаются за счет возникающих в ходе запрессовки радиальных усилий, воздействующих со стороны запрессовываемой части контакта на боковые стенки сквозного металлизированного отверстия.

В течение многих десятилетий соединения данного класса пользуются высокой популярностью в электрической и электронной областях промышленности всего мира благодаря следующим преимуществам:

- высокая механическая прочность на растяжение;
- высокая устойчивость к вибрационным нагрузкам;
- отсутствие необходимости в нагреве для образования соединения (в ряде случаев данное обстоятельство играет решающую роль);
- коррозионная стойкость за счет герметичности контакта;
- экономичность;
- простота ремонта (благодаря отсутствию нагрева);
- гигиеничность производства (благодаря отсутствию флюсов и припоев);
- высокая надежность.

Впрессовывание разъемов с десятками и сотнями штырей ускоряет процесс монтажа (по сравнению с пайкой) в 3–4 раза. Отсутствие процессов пайки позволяет избежать выполнения операций очистки от остатков флюсов и технологических загрязнений. Предварительное покрытие печатной платы электроизоляционной маской избавляет от необходимости нанесения влагозащитных покрытий. К тому же при лакировании печатных плат существует опасность случайного нежелательного нанесения лака на контактные

поверхности и, как следствие, цементации «плавающих» в корпусе разъема контактов.

В конечном итоге монтаж разъемов на панели методом запрессовки контактов в металлизированные отверстия печатных плат – это высокотехнологичный и высокопроизводительный метод реализации непаяных соединений.

Технология запрессовки родилась не на пустом месте, а явилась логическим продолжением развития технологии многослойных печатных плат. Поэтому для наиболее полного понимания ее основ и принципов, которые будут рассмотрены ниже, стоит прежде всего обратиться к истории ее создания.

Немного истории

Своим рождением технология запрессовки обязана быстрым темпам развития технологии многослойных печатных плат. Более 20 лет назад инженерная мысль обеспечила возможность создания печатных плат с массивными слоями цепей питания. Однако радость специалистов оказалась недолгой. Все преимущества, которые получали производители от таких плат, нивелировались рядом новых серьезных проблем, с которыми никому до этого сталкиваться не приходилось. Во-первых, слишком мощный теплоотвод на этих цепях исключал возможность создания нормальных температурных режимов пайки, а во-вторых, пайка в «лесу» штырей разъемов на панели плохо поддавалась автоматизации. Последняя позволила бы отказаться от применения ручного инструмента, манипуляции которым в узком пространстве между рядами штырей оказались слишком трудным занятием.

Кроме того, в то время при пайке одиночных контактов изготовители сталкивались с проблемой их удержания в сквозном металлизированном отверстии до и во время пайки. С этой целью такого рода контакты изготавливались с поперечным сечением, размеры которого преднамеренно увеличивались по сравнению с размерами отверстий, в которые эти контакты устанавливались, т.е. данная методика использовалась просто для фиксации контактов на печатной плате и исключения их проскальзывания в отверстия во время пайки. Само собой разумеется, что избыточные размеры контакта вынуждали уже тогда выполнять не просто установку контакта в отверстие, а именно его запрессовку. Однако это были лишь

предпосылки рождения технологии запрессовки. Сегодня, наверное, уже невозможно установить, кому первому пришла в голову мысль увеличить размеры поперечного сечения контакта и использовать запрессовку не только для удержания и фиксации контакта, но и для получения высоконадежного непаяного соединения, способного в будущем стать альтернативой паяному.

Сначала предпринимались попытки запрессовки контактов (штырей), которые сегодня носят название жестких контактов. Единственное, чем эти контакты отличались от обычных – это большие размеры поперечного сечения. Платы с впрессованными контактами использовались для макетных работ. На печатной плате выполнялись соединения, стандартные для всех макетов: цепи питания, цепи синхронизации и т.п. Накруткой выполнялись соединения, индивидуальные для конкретного макета.

Попытки запрессовать эти контакты в металлизированные отверстия и отказаться от пайки оказались безуспешными по следующим причинам:

- большие производственные погрешности воспроизведения размеров сочленения штырей и отверстий печатных плат приводили к тому, что некоторые сочленения не имели тугой посадки. Штыри вываливались из отверстий;
- материал основания платы, имевший в качестве связующего полимер, релаксировал, т.е. со временем постепенно раздавался под действием напряжения запрессовки, и соединение ослабевало;
- при температурах около 100 °С большая часть полимеров размягчалась и не удерживала запрессованный штырь. Кроме того, практика показала, что необходимы контакты, которые обеспечивали бы:

• невысокие усилия запрессовки;

• отсутствие ослабления соединений со временем;

• возможность использования в условиях, требующих обеспечения высокой надежности (без применения дополнительной пайки);

• исключение возможности повреждения печатной платы (а при возникновении какого-либо повреждения, чтобы оно возникало только на контакте);

• запас большей части упругой энергии в контакте;

• возможность повторного использования отверстия;

• возможность использования отверстий с широким диапазоном диаметров. Все эти проблемы требовали поиска новых решений. И решение (которое, в принципе, напрашивалось само собой) было найдено.

Для компенсации погрешностей и явлений релаксации на запрессовываемой части штыря в его конструкции стали предусматривать пружинящие элементы, которые при запрессовке контакта сжимались и сохраняли энергию сжатия неопределенно долгое время. Данные контакты, получившие название упругих (compliant pin) благодаря высоким преимуществам, практически полностью вытеснили жесткие контакты, сделав их лишь частью истории. С точки зрения допусков на диаметр сквозных металлизированных отверстий, деформации этих отверстий и усилия запрессовки, упругие контакты оказались более выгодными и эффективными.

В Советском Союзе тоже предпринимались попытки запрессовки контактов. Однако они были жесткими, и технология запрессовки использовалась только на этапе макетирования. Дальнейшее развитие эти первые шаги не получили, видимо, вследствие некоторого недоверия к соединениям данного класса и большей приверженности к паяным.

Во всем остальном мире с того времени (т.е. в течение уже двух десятилетий) были созданы самые разнообразные конфигурации пружинящих элементов, разработаны соответствующие стандарты (международный стандарт 1ЕС 352-5 и военные стандарты М1Б-С-28859 и М1Б-С-288598), а технология запрессовки получила развитие по самым различным направлениям, заработала повсеместное признание и в настоящее время считается весьма перспективной.

Благодаря тому, что к настоящему времени российские специалисты уже осознали преимущества запрессовки, данная технология получает распространение и в России. Однако вследствие того, что для нашей страны запрессовка является новым и еще не освоенным процессом, в отношении нее существует большой информационный дефицит.

Основные компоненты прессового соединения

Для понимания механизма образования соединения прежде всего необходимо рассмотреть особенности конструкции запрессовываемого контакта и структуры сквозного металлизированного

отверстия, т.е. отличительные черты основных компонентов прессового соединения.

Начать следует с контактов. Вследствие большей популярности и большей эффективности будут рассмотрены только упругие контакты.

Типовой запрессовываемый контакт, как правило, изготавливается из таких сортов медных сплавов, как олово-медь (бронза), цинк-медь (латунь) или бериллиевая медь. В зависимости от материала контакта требуются различные усилия запрессовки. Выбор материала определяется размерами и назначением контактов.

Запрессовываемый контакт. Запрессовываемый контакт состоит из части для сочленения с ответным соединителем, запрессовываемой части, заходной части и части, предназначенной или для монтажа накруткой, или установки корпуса соединителя.

Часть контакта для сочленения с ответным соединителем. Данная часть может иметь или форму штыря (в случае, если ответным соединителем является розетка), или форму лиры (в случае, если ответным соединителем является вилка). В случае, если контакт в этой части имеет форму штыря, усилие запрессовки прилагается к создаваемым именно с этой целью буртикам. Иначе, если контакт имеет лирообразное окончание, усилие запрессовки прилагается на дно лиры как на самый удобный и самый прочный для этих целей элемент конструкции. Как правило, эта часть встраивается в корпус соединителя, и именно она отвечает за удержание контакта в соединителе.

Запрессовываемая часть контакта. Основную роль в образовании соединения играет запрессовываемая часть контакта. Ее конфигурация (в поперечном сечении) может быть самой разнообразной. Главная задача, которую должна выполнять конструкция этой части контакта, – создание длительной во времени силы упругости, направленной на боковые стенки сквозного металлизированного отверстия. Размер поперечного сечения контакта в запрессовываемой части должен соответствовать диаметру отверстия, на который данный контакт рассчитан. Длина запрессовываемой части контакта должна соответствовать толщине печатной платы, в которую он устанавливается. Поверхность запрессовываемой части контакта должна быть свободна от царапин, вредных загрязнений и следов коррозии.

Заходная часть контакта. Этот фрагмент конструкции играет существенную роль при запрессовке, так как ориентирует кон-

такт надлежащим образом при его входе в отверстие и обеспечивает плавный характер деформации как запрессовываемой части самого контакта, так и боковых стенок металлизированного отверстия. Если бы этой части не было, внедрение контакта могло бы привести к многочисленным разрывам в металлизации боковых стенок отверстия.

Часть контакта под монтаж накруткой или установку корпуса соединителя. Данная часть контакта является необязательным конструктивным элементом. Существуют контакты и без этой части. Данный конструктивный элемент выполняется с целью расширения функциональных возможностей запрессовываемых контактов.

Все кромки контакта выполняются с учетом исключения вероятности повреждения отверстия при запрессовке.

Запрессовываемые контакты (в рабочем положении на плате) проходят визуальный контроль и затем испытываются на изгиб, на усилие запрессовки, усилие демонтажа, виброустойчивость, контактное сопротивление, электрическую нагрузку при воздействии повышенной температуры и климатику.

Сквозные металлизированные отверстия. Сквозные металлизированные отверстия выполняются в печатных платах номинальной толщиной 1,5–6,4 мм, изготавливаемых из стеклоэпоксида типов G 10, G 11, FR5 согласно стандартам NEMA, типа Hgw согласно стандарту DIN 7735 и типа EP согласно стандарту DIN 40802. Печатные платы должны соответствовать стандартам IEC 326-3, IEC 326-5 и IEC 326-6.

Как правило, сквозные металлизированные отверстия выполняются с контактными площадками, которые повышают механическую стойкость внутреннего покрытия.

Требуемая величина толщины медного покрытия в сквозных металлизированных отверстиях под запрессовку превышает величину аналогичного параметра в случае отверстий под пайку. Однако и допуски на эту толщину соответственно выше (например, 25–75 мкм). Слишком тонкие слои медного покрытия могут привести к увеличению усилий запрессовки.

При нанесении свинцово-оловянного покрытия крайне важно избегать получения слишком толстого его слоя, так как в этом случае его частицы будут вытесняться из отверстия любым запрессовываемым контактом (что является крайне нежелательным явлением).

В процессе формирования металлизированного отверстия при необходимости свинцово-оловянное покрытие может и не наноситься (в таком случае это будет чисто медненое отверстие). Однако, как правило, оно присутствует как на самих платах, так и в их отверстиях, играя роль защитного, а при запрессовке – «смазочного» покрытия.

Внутреннее (оловянное или свинцово-оловянное) покрытие отверстий в печатных платах может быть нанесено гальваническим методом или методом оплавления. Однако предпочтительным является метод гальванизации. В процессе гальванического нанесения свинцово-оловянного покрытия осаждение происходит более интенсивно на краях отверстий (имеется в виду не диаметр, а глубина отверстия). Во время оплавления (которое используется во многих процессах изготовления печатных плат из-за расположенных на поверхности элементов) профиль свинцово-оловянного покрытия в отверстии определяется силами поверхностного натяжения расплавленного свинцово-оловянного покрытия, приводящими к получению более толстого слоя в середине отверстия. Это приводит к различию внутренних диаметров в этом отверстии до и после оплавления.

Технология запрессовки требует не только обращать внимание на конечный диаметр отверстия в печатной плате (что обычно и делается при реализации паяных соединений), но и назначать и соблюдать определенные допуски на всю структуру отверстия. Это касается и диаметра отверстия после сверления (в первую очередь), и толщины медного покрытия (во вторую), и толщины свинцово-оловянного (припойного) покрытия (в третью), т.е. всех размеров, формирующих диаметр конечного отверстия, на который тоже назначаются допуски.

При формировании отверстия под запрессовку его диаметр после сверления больше, чем при получении металлизированного отверстия под пайку. Данный диаметр должен соблюдаться самым тщательным образом, так как именно он является основным параметром, оказывающим максимальное влияние на усилия запрессовки и выпрессовки (демонтажа).

Количество параметров структуры отверстия превышает количество параметров, обычно учитываемых при работе с платами, рассчитанными на пайку. Однако это обстоятельство никоим образом не усложняет процесс формирования отверстий под запрессовку, так как для получения заданных номиналов и допусков конеч-

ных отверстий достаточно строгого соблюдения допусков, назначаемых на различных этапах формирования конечного отверстия.

Механизм образования соединения

Запрессовка контакта начинается с подачи на его опорные поверхности (буртики или дно лиры) усилия запрессовки, составляющего максимум 20 кг (в зависимости от сочетания размеров контакта и отверстия). Под воздействием этого усилия предварительно установленный контакт начинает входить в сквозное металлизированное отверстие печатной платы. Сначала в соприкосновение с отверстием входит заходная часть, внедряющаяся в поверхностный слой покрытия отверстия и смещающая некоторую часть этого покрытия для начала формирования зоны электрического контакта. При этом начинается макроскопическая упругая деформация как запрессовываемой части контакта, так и боковых стенок отверстия. В ходе продолжающегося воздействия усилия запрессовки в действие вступает запрессовываемая часть, которая благодаря упругой деформации адаптируется под диаметр отверстия, не повреждая его. Таким образом обеспечивается плавное равномерное возрастание давления на стенки отверстия, а в зоне контакта формируется соединение, аналогичное соединениям, получаемым холодной сваркой. Упругий контакт самостоятельно встает в вертикальное положение при скольжении по стенкам отверстия (т.е. самовыравнивается) и образует зону плотного герметичного электрического контакта между собой и сквозным металлизированным отверстием, гарантируя долговременное надежное электрическое межсоединение и механическую надежность. Плотность электрического контакта обеспечивается взаимно воздействующими радиальными усилиями (со стороны штыря и со стороны отверстия), а герметичность электрического контакта достигается за счет наплыва поверхностного слоя покрытия боковых стенок отверстия по всему периметру зоны контакта после запрессовки, который заодно и запирает штырь в отверстии. При этом остаточное усилие упругой деформации поддерживает запасенную энергию и обеспечивает устойчиво высокую во времени надежность соединения.

Степень же окончательной деформации в конечном итоге определяется соотношением внутреннего диаметра сквозного металлизированного отверстия и размера поперечного сечения запрессо-

вываемой части контакта по диагонали. Текущая степень деформации находится в прямой зависимости от усилия запрессовки. Чем выше усилие запрессовки, тем выше степень деформации.

О приспособлениях

Как правило, для запрессовки контактов в печатную плату требуется специальное приспособление. Оно оказывает усилие запрессовки на элементы контакта, специально разработанные и предназначенные для этих целей. Кроме того, приспособление обеспечивает заданную глубину запрессовки контакта в печатную плату за счет использования ограничителя глубины. В общих чертах приспособление для запрессовки представляет собой комплект компонентов, устанавливаемых на ручной или автоматический пресс с плавным ходом штока и усилием, достаточным для запрессовки соединителей, подлежащих установке. При выборе пресса для впрессовывания разъемов в плату необходимо учитывать суммарное усилие, которое, например, для разъема со 160 контактами может составлять 3,2 т.

Основными компонентами комплекта для запрессовки одиночных контактов и соединителей с запрессовываемыми контактами являются пуансон (передающий давление со штока пресса на соответствующие опорные поверхности контакта) и подплатная матрица, обеспечивающая дополнительную жесткость платы.

Конструкция пуансона для запрессовки соединителей с запрессовываемыми контактами зависит от того, является ли данный соединитель розеткой или вилкой.

В отличие от пуансонов для запрессовки вилочных соединителей с их простотой конструкции, пуансоны для запрессовки розеточных соединителей представляют собой более сложное и точное техническое изделие вследствие особенностей самих соединителей.

В розеточных соединителях контакты немного утоплены в тело корпуса и, как уже говорилось выше, имеют лирообразное окончание, в которое при сочленении соединителей входит штыревой контакт ответного соединителя. Сложность конструкции пуансона обусловливается еще и тем, что само лирообразное окончание контакта находится в довольно узкой прямоугольной ячейке корпуса соединителя, и малейшее отклонение конструктивных элементов пуансона в сторону может привести к повреждению как самого

контакта, так и корпуса соединителя, в котором данный контакт установлен. Вследствие указанного обстоятельства все пуансоны для запрессовки розеточных соединителей имеют общую конструкцию.

Вторым компонентом комплекта для запрессовки одиночных контактов и соединителей с запрессовываемыми контактами является подплатная матрица. Она поддерживает печатную плату в местах, максимально приближенных к отверстиям, в которые запрессовываются контакты, и изготавливается с габаритами, достаточно большими для поддержки печатной платы в целях предотвращения ее изгиба.

Используются различные виды подплатных матриц. Некоторые имеют длинные канавки, в которые позиционируются запрессованные контакты. Такие матрицы удобно использовать при конвейерном характере выполнения операции запрессовки. В других матрицах выполняется большое количество отверстий соответственно отверстиям для запрессовки на плате. Такие матрицы обеспечивают максимальное качество соединений, однако не позволяют передвигать плату с одной позиции в другую и вынуждают приподнимать ее. Данные матрицы непригодны для массовой запрессовки.

Подплатные матрицы изготавливаются из металла (например, из стали или алюминия) или из прочной пластмассы, в любом случае из материала, обладающего прочностью, достаточной для выдерживания усилий запрессовки. Кроме того, глубина канавок/отверстий в матрице должна быть больше длины той части контакта, которая выступает из платы после запрессовки. Данное обстоятельство становится особенно актуальным при запрессовке контактов, предусматривающих последующий монтаж накруткой. Все эти приспособления позволяют добиться высокого качества получаемых результатов. Однако это не избавляет исполнителя от необходимости соблюдения аккуратности и осторожности, так как операция запрессовки является достаточно точным технологическим процессом, и малейшая невнимательность чревата повреждениями контактов, соединителей и печатных плат.

Процедура запрессовки

Операция запрессовки выполняется на одном рабочем месте, оборудованном прессом и соответствующими приспособлениями. За рубежом операция запрессовки является уже отработанной про-

цедурой. В России освоение запрессовки только начинается, и поэтому четкой последовательности и требований к технологическому процессу (ТП) еще не существует.

Зарубежный и уже существующий некоторый российский практический опыт указывает на необходимость предварительной наладки пресса до монтажа остальных соединителей, подлежащих запрессовке. Такого рода наладка (заключающаяся в настройке длины рабочего хода штока пресса) позволяет избежать как недозапрессовки соединителей (что в дальнейшем чревато нарушением сочленяемости данных соединителей с ответными частями), так и избыточной запрессовки, которая может привести к разрушению и корпуса соединителей, и структуры сквозного металлизированного отверстия. Этап наладки приобретает особенно актуальное значение при работе с соединителями разного типоразмера и платами разной толщины. Для наладки предлагается использовать технологические соединители и печатные платы, являющиеся полными аналогами тех компонентов, которые будут участвовать в дальнейшем ТП.

По состоянию на сегодняшний день (исходя из практического опыта) технологический процесс запрессовки соединителей можно представить в виде следующей последовательности действий:

1) проверка комплектности соединителей и их соответствие спецификации;

2) установка и фиксация пуансона на штоке, а подплатной матрицы – на станине пресса;

3) установка на технологическую плату технологического соединителя;

4) визуальная проверка положения соединителя на плате согласно чертежу;

5) изъятие технологической платы из контейнера (с наживленным технологическим соединителем), установка платы на направляющие пресса с предварительной их настройкой и фиксацией по габаритам платы и настройка высоты штока по технологическому соединителю согласно инструкциям фирмы-изготовителя пресса;

6) опускание штока пресса до входа пуансона в контакт с технологическим соединителем и выполнение пробной запрессовки;

7) снятие платы с направляющих и помещение ее обратно в контейнер;

8) контроль качества выполненного соединения;

9) установка на штатную плату соединителя согласно чертежу;

10) визуальная проверка положения соединителя на плате согласно чертежу;

11) изъятие платы из контейнера и установка ее на направляющие пресса;

12) визуальная проверка плотности прилегания платы к матрице и попадания всех выводов в соответствующие пазы/отверстия подплатной матрицы;

13) опускание штока пресса до входа пуансона в контакт с соединителем и выполнение запрессовки;

14) перемещение следующего соединителя под шток пресса;

15) повтор переходов 13–14 в отношении всех остальных соединителей;

16) снятие платы с направляющих пресса и помещение ее обратно в контейнер;

17) контроль качества запрессовки.

Западные фирмы-производители рекомендуют выполнять запрессовку соединителей платы с уже установленными компонентами. Однако практика показывает, что такой подход не всегда приемлем. При высоком уровне заселенности платы может оказаться недостаточно пространства для размещения подплатной матрицы (особенно если соседние компоненты имеют длинные выводы). В таких ситуациях более целесообразным является выполнение запрессовки до установки компонентов. Однако при запрессовке соединителей до пайки остальных компонентов в дальнейшем они могут подвергнуться избыточным тепловым воздействиям, способным оказать негативное влияние на качество соединения, выполненного запрессовкой. Нагрев приводит к ослаблению соединений: под действием нагрева «плывет» материал основания и прессовое соединение ослабляется. Но если пайка выполняется все же после впрессовывания контактов, необходимо принять меры к предотвращению нагрева прессовых соединений. В данной ситуации встает проблема взаимоприемлемого компромисса и необходимости оценки возможной степени влияния пайки соседних компонентов на качество уже запрессованных соединителей.

Направления развития технологии запрессовки

В электронике продолжает свое устойчивое развитие тенденция миниатюризации компонентов и интегральных схем. Однако в отличие от остальных компонентов до недавнего времени в миниатюризации соединителей не было значительных сдвигов. Сегодня уже появляются соединители с высокой плотностью расположения выводов. Такие соединители имеют те же габариты, что и 96-контактные соединители типа С (соответствующие ОШ 41612), но отличаются значительно более высоким количеством контактов (172). Шаг выводов данных соединителей составляет 1,905 мм.

Для создания запрессовываемых соединителей с меньшим шагом выводов необходима разработка контактов с более компактной запрессовываемой частью. При конструировании запрессовываемой части контакта, предназначенного для установки в сквозное металлизированное отверстие диаметром меньше 1 мм, необходимо учитывать возможности массового воспроизведения такого контакта, а также технологические и экономические возможности производства печатных плат с точки зрения обеспечения более высоких допусков, которые потребуются для установки миниатюрного соединителя.

Миниатюризация запрессовываемых контактов может быть осуществлена постепенно. Сначала могут создаваться исполнения контактов для сквозных металлизированных отверстий диаметров 0,6 и 0,75 мм. Несмотря на такое снижение в диаметре, оба исполнения контактов предусматривают изготовление отверстий с допусками до 0,1 мм. Возможности современных технологических процессов позволяют создавать печатные платы под запрессовку с сеткой 1,27 мм при диаметре сверленого сквозного отверстия 0,6 мм.

Проблемы технологии запрессовки

Несмотря на достаточно высокую степень освоения технологии запрессовки, в данной области существует масса проблем, которые до сих пор не решены ни за рубежом, ни тем более в России. Например, до сих пор стоит вопрос о том, какие именно элементы конструкции платы принимают на себя напряженное состояние запрессованного контакта. Ими может быть металлизация отверстия. Но ее толщина всего 25 мкм. К тому же доля упругости меди составляет всего 0,5 % от общей деформации. Кроме того, таким эле-

ментом может быть стенка отверстия в стеклоэпоксидной композиции основания платы. Это очень важно для назначения требований к геометрии отверстия: или после металлизации, или после сверления.

Необходимо изучение зависимости напряженного состояния компонентов соединения от температуры для оценки влияния нагрева, возникающего при пайке после запрессовки контактов.

Необходимо определение степени влияния скорости запрессовки на характеристики и качество соединения.

Необходимы определение длительности напряженного состояния в соединении и оценка надежности системы в экстремальных условиях эксплуатации, что особенно важно для установления целесообразности применения технологии запрессовки в изделиях военного назначения (хотя за рубежом этот вопрос уже решен в положительную сторону и даже разработаны военные стандарты на соединения данного типа (М1Б-С-28859 и М11-С-288598)).

Наконец, самая важная и трудная проблема на сегодняшний день – это поиск методов и критериев оценки качества соединений, получаемых запрессовкой. Наиболее предпочтительными здесь явились бы неразрушающие методы контроля. Однако, к сожалению, сегодня во всем мире оценка качества прессовых соединений выполняется лишь по микрошлифам, снимаемым с образцов-свидетелей, что, естественно, приводит к росту затрат на производство изделий электронной техники. Параллельно с этим за рубежом широко применяется метод конечных элементов, позволяющий еще до запрессовки оценить параметры соединения, подобрать оптимальные условия его получения и на выходе получить результаты, отличающиеся заведомо высоким качеством. Однако такой подход все же не дает возможности определить реальную картину прессового соединения. Все эти проблемы для своего решения требуют проведения тщательных и широкомасштабных исследований.

Заключение

Соединения, выполняемые запрессовкой, обладают высоким уровнем надежности, способным конкурировать с паяными соединениями. При этом они лишены тех проблем, которые традиционно сопровождают процессы пайки. Данные соединения сравнительно просты в реализации, требуют минимального комплекта оборудования и отличаются экономической эффективностью, экологич-

ностью и ремонтопригодностью. Поэтому технологию запрессовки можно рассматривать в качестве более выгодной и перспективной альтернативы технологиям пайки.

В отличие от западных производителей, уже давно и основательно освоивших технологию запрессовки, российские фирмы только сегодня начинают применять запрессовку в производстве своих изделий. Уже около десятка фирм, заинтересовавшихся запрессовкой, пытаются интегрировать данную технологию в свои ТП. Однако делают они это и без надлежащих знаний, и без надлежащей квалификации. Причем данное обстоятельство особенно актуально для продукции военного назначения, производство которой предусматривает строгое следование всем соответствующим требованиям. Поэтому первой и основной задачей на сегодняшний день является разработка соответствующих ГОСТов и ОСТов, которые узаконили бы технологию запрессовки в России и явились бы документальным основанием для ее применения. А пока этого не произошло, необходимо распространять знания об этой технологии для подготовки производителей к ее принятию.

Глава 7

Контроль радиоэлектронных систем

7.1. Системы технического контроля при производстве радиоэлектронных средств

7.1.1. Понятие технического контроля и основная терминология

Современные требования к важнейшим проблемам обеспечения качества продукции и повышения эффективности производства характеризуются прежде всего системным подходом, основные принципы которого заключаются в следующем:

- целостность системы (свойства целого не могут быть поняты без учета свойств хотя бы некоторых элементов системы, и наоборот);
- учет особенностей структуры и организации системы;
- наличие управления как способа регулирования системных процессов;
- необходимость постановки цели и определения целесообразного поведения системы.

Принципы системного подхода в настоящее время широко используются при разработке систем управления качеством продукции, которые представляют собой сложные многоуровневые иерархии, состоящие, как правило, из нескольких подсистем.

Проблема управления качеством продукции решается на различных этапах ее создания: при разработке, производстве и эксплуатации.

Подсистема (система) технического контроля является важнейшей составной частью системы управления качеством на этапе производства ЭЗА. Технический контроль есть проверка соответствия продукции или процесса установленным техническим требованиям (ГОСТ 16.504–74). Сущность контроля сводится к получению информации о фактическом состоянии объекта контроля, о призна-

ках и показателях его свойств (получение первичной информации) и к сопоставлению первичной информации с требуемой (получение вторичной информации).

Вторичная информация используется для выработки соответствующего управляющего воздействия. Принятие решения не является частью контроля – это этап управления. Таким образом, контроль является частью управления.

На стадии разработки контроль заключается в проверке соответствия опытного образца или разработанной технической документации правилам оформления и техническому заданию.

На стадии производства технический контроль охватывает качество, комплектность, упаковку, маркировку и количество предъявленной продукции, ход (состояние) производственного процесса (рис. 135).

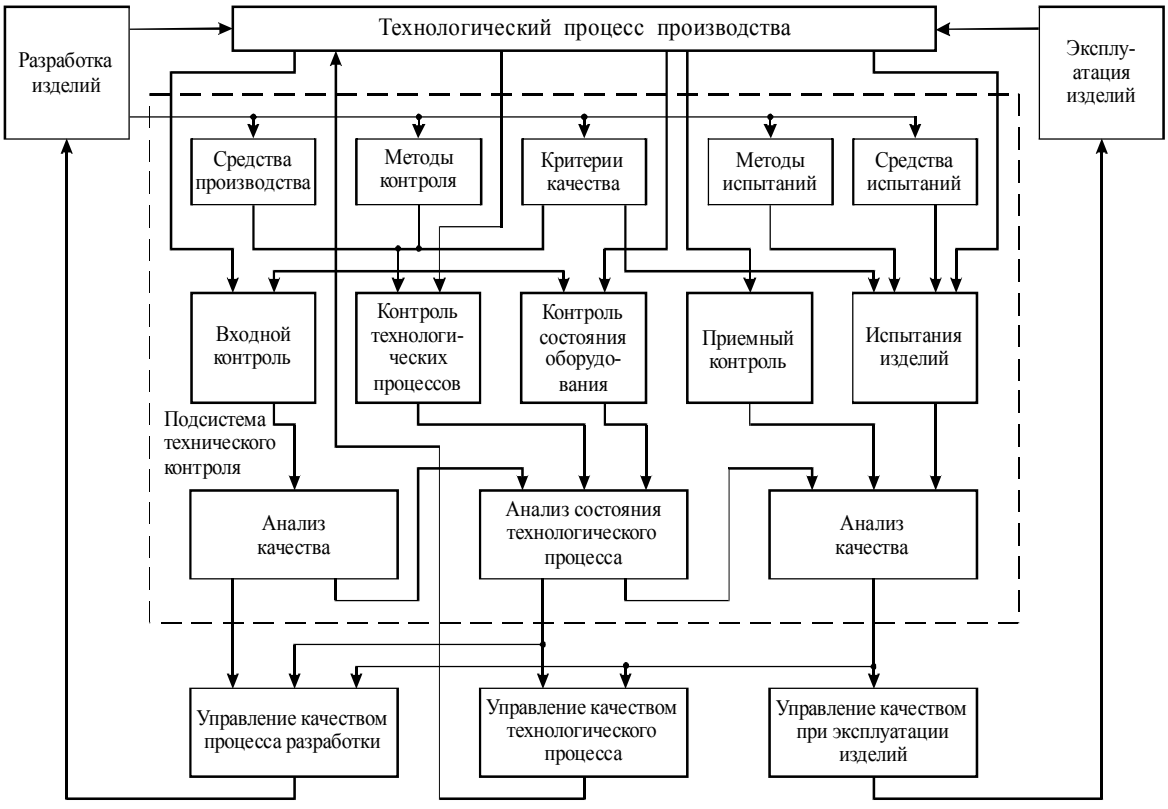


Рис. 135. Структура систем контроля

На стадии эксплуатации технический контроль заключается, например, в проверке соблюдения требований эксплуатационной и ремонтной документации.

Объектом контроля является продукция или процесс, подвергаемые контролю. При контроле происходит определение контролируемых признаков в контрольных точках объекта контроля. Контрольный признак – это количественная или качественная характеристика свойств объекта контроля, а контрольная точка – место нахождения первичного источника информации о контролируемом признаке. Изделие или материал, применяемые для осуществления контроля, называются средством контроля. Для осуществления контроля используются определенные методы контроля.

Совокупность средств контроля и исполнителей, взаимодействующих с объектом контроля по правилам, установленным соответствующей документацией, образует систему контроля. Системы контроля бывают автоматизированными и автоматическими. В автоматизированной системе контроль осуществляется с частичным непосредственным участием человека, автоматические системы контроля функционируют без непосредственного участия человека.

7.1.2. Виды технического контроля

На практике применяются различные виды технического контроля (рис. 136). Соответствующие термины определяются по стандарту ГОСТ 16.504–74.

Контроль качества продукции – контроль количественных и (или) качественных характеристик свойств продукции.

Контроль проектирования – контроль процесса проектирования конструкторской и (или) технологической документации.

Производственный контроль – контроль производственного процесса и его результатов на стадии изготовления продукции.

Эксплуатационный контроль – контроль, осуществляемый на стадии эксплуатации.

Контроль технологического процесса – контроль режимов характеристик, параметров технологического процесса.

Входной контроль – контроль продукции поставщика, поступившей к потребителю (заказчику) и предназначенной для использования при изготовлении, ремонте или эксплуатации продукции.

Операционный контроль – контроль продукции или процесса во время выполнения или после завершения очередной технологической операции.

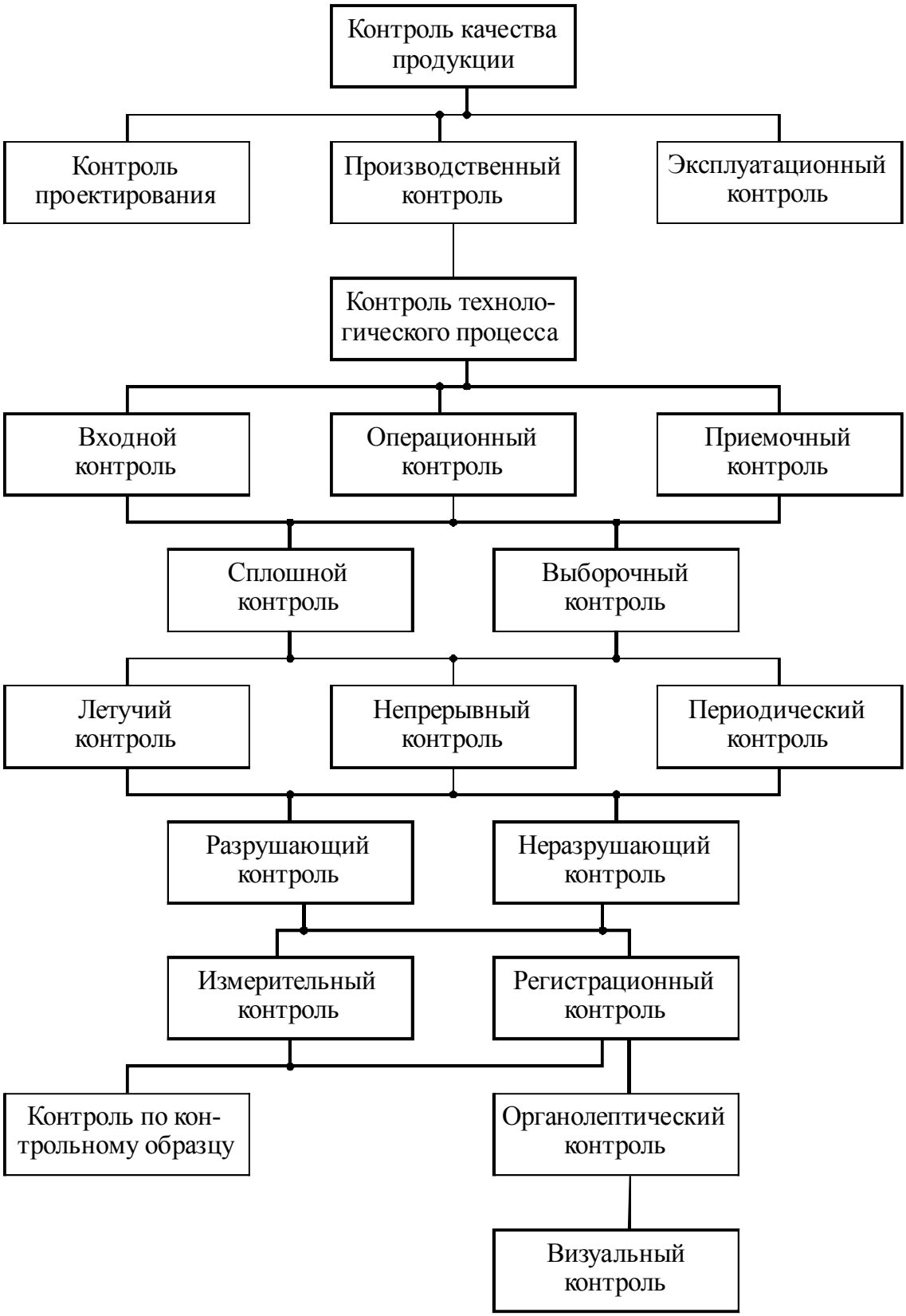


Рис. 136. Классификационная схема видов контроля

Приемочный контроль (термин «выходной контроль» в соответствии с ГОСТ 16.504–74 недопустим) – контроль готовой продукции, по результатам которого принимается решение о ее пригодности к поставке и (или) использованию.

Сплошной контроль (термин «стопроцентный контроль» недопустим) – контроль каждой единицы продукции, осуществляемый с одинаковой полнотой.

Выборочный контроль – контроль выборок или проб из партии или потока продукции.

Летучий контроль – контроль, который начинается в случайные моменты времени, выбираемые в установленном порядке.

Непрерывный контроль – контроль, при котором поступление информации о контролируемых признаках происходит непрерывно.

Периодический контроль – контроль, при котором поступление информации о контролируемых признаках происходит через установленные интервалы времени.

Разрушающий контроль – контроль качества продукции, который может нарушить ее пригодность к использованию по назначению.

Неразрушающий контроль – контроль качества продукции, который должен не нарушать ее пригодность к использованию по назначению.

Измерительный контроль – контроль, осуществляемый с обязательным применением средств измерений.

Регистрационный контроль – контроль, осуществляемый на основании результатов подсчета и (или) регистрацией определенных изделий, событий или качественных признаков продукции.

Контроль по контрольному образцу (метод электрического копирования) – контроль качества продукции, осуществляемый методом сравнения ее признаков с признаком контрольного образца.

Органолептический контроль – контроль, при котором первоначальная информация воспринимается посредством только органов чувств без учета численных значений контролируемых признаков.

Визуальный контроль – органолептический контроль, осуществляемый только органами зрения.

7.1.3. Основные показатели контроля

Количественная характеристика свойств контроля называется показателем контроля. Согласно ГОСТ 14.306–73 обязательными показателями процесса контроля являются точность измерений, достоверность, трудоемкость и стоимость контроля. В зависимости от специфики и объекта контроля могут вводиться и другие показатели контроля, например, погрешность измерений, объем, полнота, периодичность и продолжительность контроля и т.д. Рассмотрим более подробно некоторые показатели контроля.

Точность измерений согласно ГОСТ 16.263–70 – это качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины. Количественно точность может быть выражена обратной величиной модуля относительной погрешности.

Под погрешностью измерения понимается отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Погрешности бывают абсолютными и относительными.

Абсолютная погрешность – погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины (ГОСТ 16.263–70). Рассмотрим равенство

$$\Delta X = X_{\text{изм}} - X\,, \qquad (74)$$

где ΔX – абсолютная погрешность величины X; $X_{\text{изм}}$ – значение, полученное при измерении; X – истинное значение.

Истинное значение измеряемой величины X обычно неизвестно, более того, абсолютно точно его измерить нельзя, поэтому на практике измерение всегда приближенно. Для оценки погрешности ΔX по формуле (74) вместо истинного значения величины X применяют значение, полученное при измерении той же величины с точностью в несколько раз более высокой.

Относительной погрешностью измерения называется отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины, т.е.

$$\delta X = \frac{\Delta X}{X},\ X \neq 0\,.$$

Необходимо подчеркнуть, что структура погрешности является сложной, она содержит обычно несколько аддитивных составляющих, например, систематическую, случайную, инструменталь-

ную, погрешность метода измерений, погрешность отсчитывания, погрешность поверок и др. Определения указанных составляющих погрешности рассмотрены в ГОСТ 16.263–70. Методы оценки составляющих погрешности основаны на методах теории вероятностей и математической статистики.

Достоверностью контроля согласно ГОСТ 14.306–73 называется вероятность соответствия результатов контроля действительным значениям контролируемых признаков.

Достоверность контроля характеризуется степенью доверия к результатам контроля. При контроле контролируемый параметр сравнивается с полем допуска (a,b).

В результате контроля принимается одно из двух решений:

- изделие принимается, если значение параметра X находится внутри поля допуска

$$a < X < b; \tag{75}$$

- изделие бракуется, если значение параметра X находится вне поля допуска

$$X < a, X > b. \tag{76}$$

Ошибки принятия решения обусловлены двумя причинами:

- при сплошном контроле – случайными ошибками измерения параметра X;
- при выборочном контроле – случайным характером выборки, обусловливающим неравенство выборочной средней генеральной характеристики математического ожидания.

Контроль можно рассматривать как проверку двух взаимоисключающих гипотез: гипотезы H_0 о соответствии параметра установленным требованиям и гипотезы $\overline{H_0}$ о несоответствии параметра установленным требованиям; поэтому целесообразно для анализа достоверности контроля использовать общую теорию проверки статистических гипотез. Рассмотрим применение этой теории к оценке достоверности результатов сплошного контроля.

Пусть X – истинное значение контролируемого параметра, а y – случайная погрешность его измерения. Тогда правило принятия решения (75), (76) не может быть применено, поскольку X не известно, а известно только измеренное значение параметра

$$Z = X + y.$$

Сформулируем новое правило принятия решения:

- изделие принимается, если

$$a < Z < b;$$

- изделие бракуется, если

$$Z < a, Z > b.$$

При таком реальном контроле происходит одно из четырех несовместных событий:

- H_1 – правильная приемка, когда истинное и измеренное значения параметра находятся в пределах допуска $(a < X < b, a < Z < b)$;

- H_2 – забракование годного изделия, когда истинное значение параметра находится в пределах допуска, а измеренное – за его пределами $(a < Z < b, Z > b$ или $Z < a)$.

Событие, заключающееся в забраковании годного изделия, называется ошибкой первого рода.

Количественно ошибка первого рода характеризуется ее вероятностью α, которая называется риском поставщика; H_3 – прием негодного изделия, когда истинное значение параметра лежит за пределами допуска, а измеренное – в пределах допуска $(X < a$ или $X > b$, а $a < Z < b)$.

Событие, заключающееся в приемке негодного изделия, называется ошибкой второго рода.

Количественно ошибка второго рода характеризуется ее вероятностью β, которая называется риском заказчика; H_4 – правильная браковка, когда истинное и измеренное значения параметра лежат за пределами допуска $(X < a$ или $X > b$ и $Z < a$ или $Z > b)$.

Количественно достоверность контроля оценивается по вероятности ошибок I рода – α и II рода – β или с помощью показателя, являющегося функцией α и β, например, учитывающего стоимость потерь, вызванных ошибками I и II рода.

Рациональный выбор средств измерений может быть сделан, если известны зависимость риска поставщика α и риска заказчика β от ошибки измерения и зависимость стоимости средств измерений от их точности.

Рассмотрим методику вычислений α и β. Пусть заданы границы поля допуска a и b, плотность вероятности истинного значе-

ния измеряемого параметра $f_1(X)$ и плотность вероятности случайной погрешности измерений $f_2(y)$.

Если ошибка зависит от значения параметра, то можно использовать совместную плотность вероятности $f(X, y)$. По исходным данным определяются ненормированные плотности вероятности $\Psi_1(X)$, $\Psi_2(X)$, $\Psi_3(X)$ (рис. 137), интегрирование которых позволит вычислить α и β.

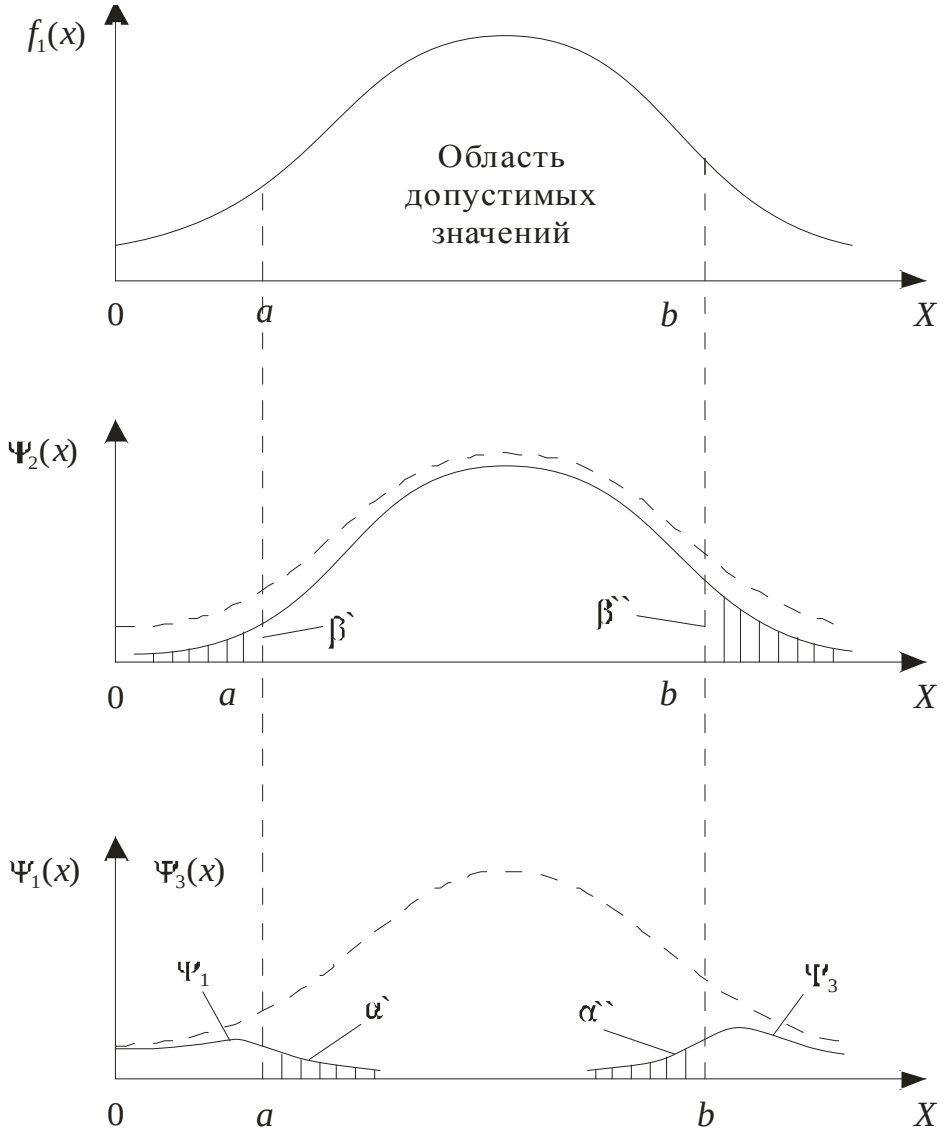


Рис. 137. Ненормированные плотности вероятности

Здесь $\Psi_1(X)$ – ненормированная плотность вероятности истинного значения параметра X при условии, что $Z < a$, т.е. измеренное значение параметра не больше a. $\Psi_3(X)$ – ненормированная

плотность вероятности истинного значения параметра X при условии, что $Z > b$, т.е. измеренное значение параметра не меньше b. $\Psi_2(X)$ – ненормированная плотность вероятности истинного значения параметра X при условии, что измеренное значение параметра лежит внутри поля допуска, т.е. $a < Z < b$.

Поскольку $\Psi_1(X), \Psi_2(X)$ и $\Psi_3(X)$ – условные плотности вероятности, важно правильно определить пределы интегрирования при вычислении α и β. На координатной плоскости XOy (рис. 138) можно указать три области, соответствующие различным решениям:

I – ($X + y < a$ – изделие бракуется) соответствует плотности $\Psi_1(X)$;

II – ($a < X + y$ – изделие принимается) соответствует плотности $\Psi_2(X)$;

III – ($X + y > b$ – изделие бракуется) соответствует плотности $\Psi_3(X)$.

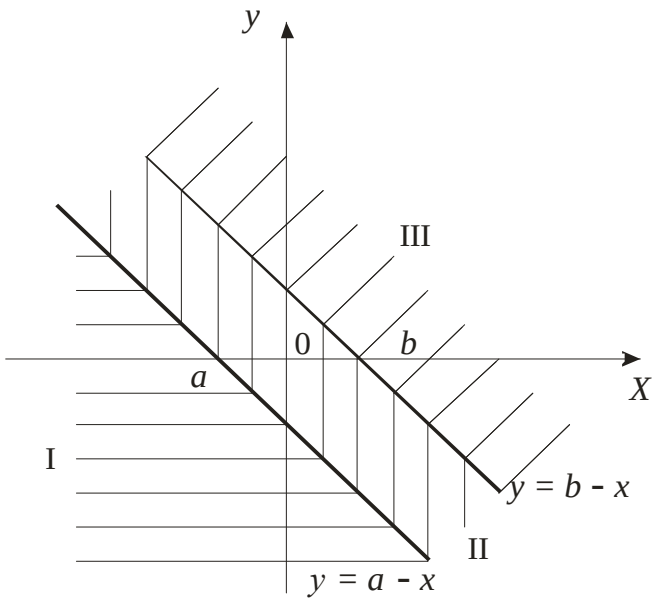


Рис. 138. Области интегрирования

Уравнения границ областей:

- области I и II – $y = a - x$;
- области II и III – $y = b - x$.

Для вычисления условных плотностей распределения зададимся совместной плотностью вероятности $f(x,y)$. Для того, чтобы получить плотность вероятности для одной переменной, нужно проинтегрировать совместную плотность по другой переменной, причем интегрирование должно вестись по области, где выполняется заданное условие. Такие условия соответствуют областям I, II и III, поэтому пределы интегрирования должны соответствовать границам областей.

Тогда

$$\Psi_1(X) = \int_{-\infty}^{y=a-x} f(x,y)dy \text{ интегрируем по I области;} \quad (77)$$

$$\Psi_2(X) = \int_{a-x}^{b-x} f(x,y)dy \text{ интегрируем по II области;} \quad (78)$$

$$\Psi_3(X) = \int_{b-x}^{\infty} f(x,y)dy \text{ интегрируем по III области.} \quad (79)$$

При независимых x и y

$$f(x,y) = f_1(x)\,f_2(y)$$

и выражения (77–79) примут вид

$$\Psi_1(x) = f_1(x)\int_{-\infty}^{a-x} f_2(y) = f_1(x)F_2(a-x);$$

$$\Psi_2(x) = f_2(x)\int_{a-x}^{b-x} f_2(y)dy = f_1(x)[F_2(b-x) - F_2(a-x)];$$

$$\Psi_3(x) = f_1(x)\int_{b-x}^{\infty} f_2(y)dy = f_1(x)[1 - F_2(b-x)],$$

где $F_2(y)$ – функция распределения погрешности измерения y.

По известным $\Psi_1(X)$, $\Psi_2(X)$, $\Psi_3(X)$, используя рис. 132, определим вероятность ошибок I и II рода:

$$\alpha = P(H_2) = \int_a^b \Psi_1(x)dx + \int_a^b \Psi_3(x)dx =$$

$$= \int_a^b f_1(x)F_2(a-x)dx + \int_a^b f_1(x)[1 - F_2(b-x)]dx; \quad (80)$$

$$\beta = P(H_3) = \int_{-\infty}^{a} \Psi_2(x)dx + \int_{b}^{\infty} \Psi_2(x)dx =$$

$$= \int_{-\infty}^{a} f_1(x)[F_2(b-x) - F_2(a-x)]dx +$$

$$+ \int_{b}^{\infty} f_1(x)[F_2(b-x) - F_2(a-x)]dx. \qquad (81)$$

Расчеты по формулам (80) и (81) требуют, как правило, численного интегрирования, поэтому для некоторых законов распределения имеются номограммы, облегчающие выполнение расчетов.

Для нормального закона распределения параметра и погрешности

$$f_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\Pi}\delta_x} \exp - \left[\frac{(x-m_x)^2}{2\delta_y^2} \right],$$

$$f_2(y) = \frac{1}{\sqrt{2\Pi}\delta_y} \exp \left[-\frac{y^2}{2\delta_y^2} \right]$$

и симметричного распределения значений X относительно середины поля допуска $a - b = 2\delta$.

Стоимостью контроля согласно ГОСТ 14.306–73 называется стоимость проведения одного процесса контроля. На этапе производства технический контроль осуществляется с помощью систем контроля. Стоимость системы контроля складывается из стоимости средств контроля $C_{\text{ск}}$, стоимости эксплуатационных расходов, связанных с содержанием средств контроля $C_{\text{эр}}$, и стоимости содержания инженерно-технического персонала, обслуживающего объект контроля с помощью средств контроля. Стоимость контроля $C_{\text{к}}$ может быть вычислена по формуле

$$C_{\text{к}} = \frac{1}{N}(C_{\text{ск}} + C_{\text{эр}} + C_{\text{итр}}),$$

где N – число процессов контроля, проведенных за тот же календарный период, за который взяты стоимости $C_{\text{эр}}$ и $C_{\text{итр}}$.

Трудоемкостью контроля называются трудозатраты на проведение одного процесса контроля.

В условиях производства, однако, более важными являются другие экономические показатели контроля, такие как годовой экономический эффект, срок окупаемости средств контроля и т.д., например, в приложении 2 к ГОСТ 14.306–73 приводится методика расчета экономической эффективности выбираемого средства контроля. При разработке и внедрении автоматизированных и автоматических систем контроля оцениваются экономические показатели эффективности QT повышения степени автоматизации и качества контроля. На предприятиях, где внедряется (внедрена) система управления качеством, экономические показатели подсистемы технического контроля учитываются при оценке эффективности системы управления качеством и при ее оптимизации по экономическим критериям.

Дадим определения некоторых других показателей контроля.

Полнотой контроля называется отношение количества контролируемых признаков объекта на данной операции к общему количеству контролируемых признаков.

Объемом контроля называется отношение количества объектов контроля в выборке к общему количеству объектов контроля в партии изделий.

Продолжительность контроля есть суммарное время подготовки и проведения одного процесса контроля.

Заметим, что методику расчета принятых показателей контроля и порядок их учета устанавливает предприятие-разработчик.

7.1.4. Методика выбора средств контроля и испытаний

Методика выбора средств контроля определяется ГОСТ 14.306–73. Выбор средств контроля должен быть основан на обеспечении заданных показателей процесса контроля и анализа затрат на реализацию процесса контроля в установленный промежуток времени при заданном качестве изделий. Выбор варианта средств контроля на основании анализа затрат определяется следующей информацией:

- техническими требованиями к изделию;
- количеством изделий и сроками их изготовления;

- техническими возможностями средств контроля;
- затратами на приобретение средств контроля и их эксплуатацию.

При выборе варианта учитываются требования техники безопасности и промышленной санитарии.

При выборе средств контроля используются следующие виды документации:

- конструкторская документация на изделия;
- технологическая документация на изготовление и контроль изделия;
- государственные, отраслевые стандарты и стандарты предприятий на средства контроля;
- технологическая документация на изготовление и контроль;
- классификаторы средств контроля;
- картотеки применяемости средств контроля;
- инструктивно-методические материалы по проведению выбора средств контроля.

7.1.5. Технологическая регулировка и настройка радиоэлектронных средств

Основные принципы построения регулировочных и настроечных операций.

Настройка и регулировка составляют от 30 до 50 % стоимости изделия. Под регулировочными процессами понимают комплекс работ по доведению параметров радиотехнического устройства до соответствующих требованиям ТУ или до нормалей величин образцов, принятых за эталон, с заданной степенью точности.

Регулировочные процессы включают в себя:

- настройку резонансных систем;
- сопряжение электрических, радиотехнических, кинематических параметров всего устройства;
- установку режимов отдельных каскадов;
- приведение параметров в соответствие с требованием ТУ;
- контроль монтажно-сборочных работ.

Цель регулировки – получение такого разброса параметров, который гарантировал бы работоспособность аппаратуры в условиях эксплуатации. Регулировка состоит в том, чтобы, не изменяя схемы и конструкции, обеспечить заданные параметры устройства при наименьших затратах. Ее осуществляют за счет целенаправленного изменения параметров регулировочных элементов.

Особенности и объем регулировочных работ определяются конструкцией устройства и его назначением, степенью требуемой точности его работы, а также видом производства и технической оснащенностью ТП.

Различают производственную и эксплуатационную регулировки. Заводская регулировка осуществляется на заводе-изготовителе и выполняется всеми имеющимися в устройстве регулировочными органами при среднем их положении с целью получения наилучших рабочих характеристик устройства в процессе его эксплуатации. В массовом производстве регулировочные работы дифференцируют, разделяя ТП настройки на простые операции, предусматривающие получение одного или нескольких взаимосвязанных параметров с применением минимального количества приборов и инструментов. При регулировке замена ранее установленных элементов не производится.

Производственной регулировкой называют предусмотренную технологическим процессом компенсацию неточности изготовления деталей и узлов, необходимую для надежного функционирования аппаратуры.

Регулировкой при техническом обслуживании (профилактике) компенсируют уход параметров из-за старения.

Наладка включает выявление и устранение недостатков разработок (регулировка макета, первых образцов) узлов РЭС в целом, частичного анализа правильности принятых решений.

Настройка – преднамеренное изменение параметров РЭС, осуществляемое в процессе эксплуатации оператором, аппаратом (приемник, волномер).

Контроль – проверка узлов, элементов РЭС в целом на соответствие нормам ТУ в процессе производства, хранения, непосредственно перед применением.

Если контроль имитирует реальные условия, то говорят об испытаниях РЭС.

Контролируя отклонения регулируемого параметра от номинала, вносят определенные изменения в аппаратуру. Цель этого – получение требуемых характеристик.

Обобщенная структурная схема регулировки приведена на рис. 139,*а*). Стимулятор представляет собой устройство, формирующее внешнее воздействие на регулируемый аппарат. Под влиянием стимулятора регулируемый аппарат начинает функционировать. Измерительное устройство определяется теми характеристиками, по которым осуществляется регулировка РЭС. При регулировке оператор, контролируя отклонения регулируемого параметра от номинала, вносит необходимые изменения в работу РЭС с целью получения требуемой рабочей характеристики.

Существует два основных метода регулировки:

1) путем сравнения настраиваемого прибора с образцом (метод электрического копирования, рис. 139,*б*);

2) по измерительным приборам (инструментальная регулировка, рис. 139,*в*).

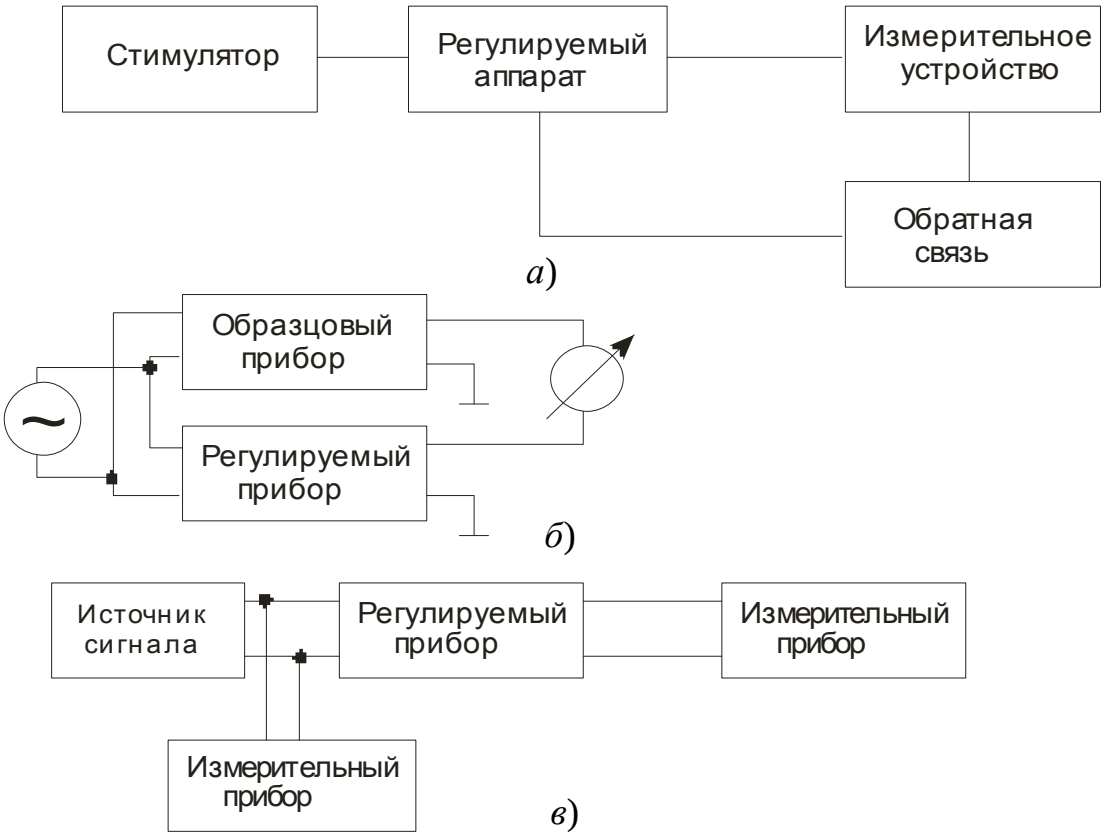


Рис. 139. Методы регулировки:

а – обобщенная схема регулировки; *б* – метод электрического копирования; *в* – по измерительным приборам

Сущность метода регулировки по измерительным приборам заключается в следующем: на вход регулируемого прибора подается определенное значение требуемого параметра. С помощью регулировочных элементов добиваются того, чтобы на выходе получить необходимую величину интересующего нас параметра.

Характерным для этого метода является то, что известны $U_{вх}$ и $U_{вых}$ регулируемого объекта, т.е. абсолютные значения измеряемой величины.

При настройке по измерительным приборам определяются:

1) погрешность настраиваемой аппаратуры;

2) ошибка измерительных приборов в определении параметра настраиваемой аппаратуры;

3) ошибка в измерении параметра из-за отличия температуры настройки от номинала;

4) ошибка, вызванная старением прибора, т.е. функция числа включения прибора, зависящая от числа циклов измерения параметра, прошедших до момента наблюдения;

5) ошибка, вызванная неточностью поддержания режима питания.

Регулировка методом электрического копирования заключается в том, что производится сравнение эффекта воздействия источника возбуждающего напряжения как на регулируемый объект, так и на образец. При этом нет необходимости знать точную величину напряжения.

Использование метода электрического копирования не встречает принципиальных трудностей тогда, когда основную часть общей погрешности составляют ошибки измерительных приборов и методов измерения.

Образец может быть настроен с меньшей ошибкой, чем серийный прибор, поэтому метод электрического копирования дает возможность уменьшить допуски на выпускаемую аппаратуру при применении более простых измерительных средств.

Сущность регулировочных работ сводится к тому, чтобы при наименьших затратах получить от данной аппаратуры требуемый эффект. Введение регулировочных работ прежде всего преследует цель – уменьшение стоимости выпускаемой продукции.

Степень влияния регулировочного элемента на выходной параметр определяется чувствительностью, в качестве прямых оценок

которой принято использовать частные производные выходных параметров РЭС по вариациям параметров элементов. Функция чувствительности определяется так:

$$S_{ij} = \frac{\delta P_j}{\delta Z_i},$$

функция чувствительности j-го выходного параметра P_j по i-му регулировочному параметру Z_i. Количественные оценки S_{ij} носят название коэффициентов влияния.

Наибольший экономический эффект при использовании элементов с широкими допусками в сочетании с регулировкой в конструкциях РЭС может быть достигнут при наименьших затратах труда, времени и средств на эту операцию. Поэтому возникает задача оптимизации ТП регулировки, т.е. разработки таких методов регулировки, которые позволили бы сократить время регулировки, а следовательно, материальные затраты и ускорить выпуск РЭС.

Основное затруднение заключается в отсутствии удовлетворительных математических моделей, описывающих связь между выходными параметрами устройств и параметрами элементов регулировки.

Оптимизация процесса регулировки может быть выполнена на основании информации, получаемой в результате постановки пассивного или активного экспериментов.

Пассивный эксперимент – это пассивное наблюдение за работой РЭС в нормальном режиме, в результате которого удается собрать статистическую информацию, подлежащую соответствующей обработке.

Активный эксперимент предполагает активное воздействие на РЭС по заранее разработанной программе.

Первым этапом процесса регулировки является сбор и изучение имеющейся информации, включающей исследование структуры и принципиальной схемы РЭС, с целью определения чувствительности к изменению параметров регулировочных элементов.

Сущность метода ранговой корреляции для решения задач регулировки состоит в рациональной обработке имеющейся субъективной информации, получаемой в результате опроса опытных специалистов-регулировщиков, технологов и др. Можно также использовать пассивный эксперимент на физической модели РЭС или определение функций чувствительности S_{ij} при наличии математического описания РЭС.

Второй этап оптимизации – это получение программы регулировки, обеспечивающей выход в область оптимального значения выходного параметра посредством дискретного изменения параметров регулировочных элементов с минимальными затратами времени. Второй этап может быть выполнен на основе результатов первого этапа либо с помощью классического, либо с помощью градиентных методов (рис. 140), а также динамического программирования многошагового процесса (рис. 141).

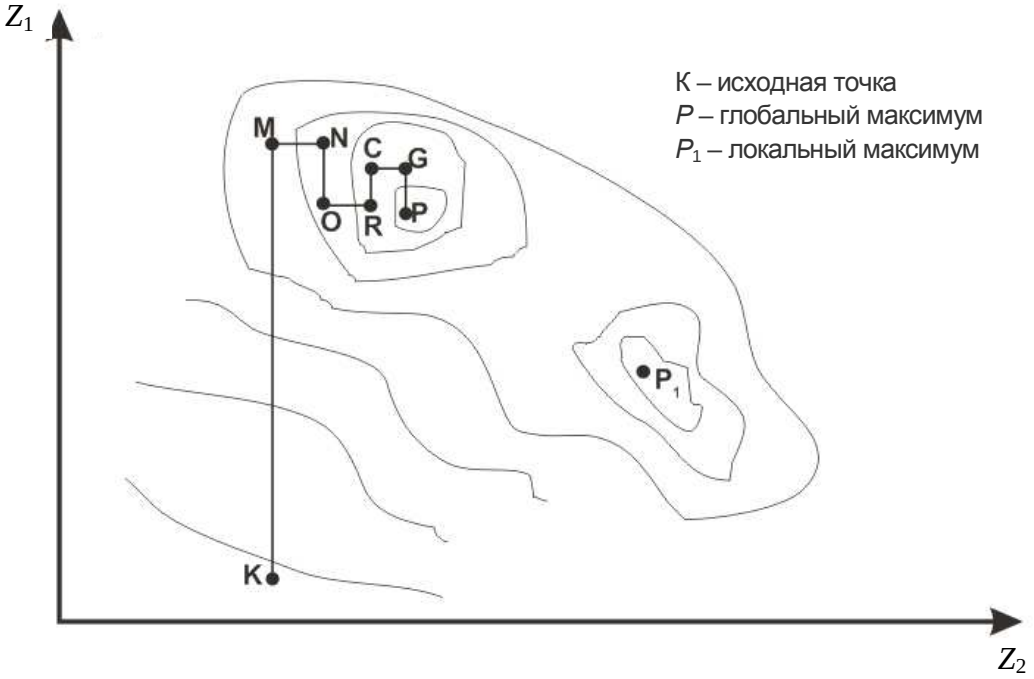


Рис. 140. Классический метод решения задач регулировки

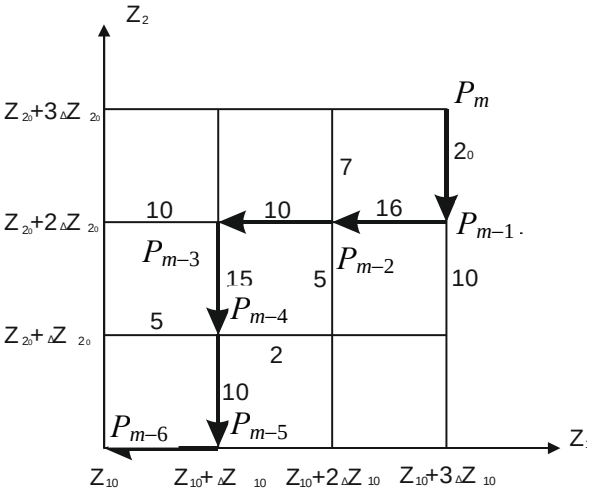


Рис. 141. Пример поиска оптимальной стратегии регулировки РЭА, имеющего два регулировочных элемента z_1 и z_2

При использовании классического метода для выхода в область оптимального значения выходного параметра поочередно изменяют параметры каждого регулировочного элемента до достижения частного максимума. Траектория движения по поверхности $P = f(z_1, z_2)$ показана на рис. 141.

Изменением параметра z_2 начинают движение из исходной точки K в точку первого частного максимума L, из которой, варьируя параметр z_1, попадают в точку *M*. Многократное поочередное обращение к регулировочным элементам z_1 и z_2 позволяет достичь основного максимума P.

Недостатком метода является сложность и длительность траектории движения. При сложной поверхности функции $P = f(z_1, z_2)$ процесс поиска оптимума классическим методом становится чрезвычайно трудоемким и в ряде случаев не позволяет найти основной оптимум функции (P' – это частичный максимум). Предварительно необходимо исследовать функцию, так как если регулировка начинается с изменения наиболее влияющего в исходном состоянии РЭА параметра, то основной оптимум может быть достигнут значительно быстрее, а вероятность попадания в область частного оптимума уменьшена.

Метод динамического программирования удобно интерпретировать как некоторый многошаговый процесс последовательного принятия условных оптимальных решений, причем решения на каждом шаге принимаются исходя из интересов всего процесса в целом, а не каждого шага в отдельности.

Для применения метода динамического программирования необходимо, чтобы задача имела многошаговую структуру, т.е. следующее решение нужно принимать от решения, принятого на последнем шаге.

Процесс поиска оптимальной стратегии регулировки РЭА методом динамического программирования обычно разворачивается в обратном направлении – от конца к началу – и может быть представлен так.

Планируется m-шаговая операция регулировки. Относительно известного состояния выходного параметра РЭА на последнем m-м шаге P_m выполняются пробные движения по координатам параметров каждого из регулировочных элементов и выбирается управление, дающее максимальное приращение выходного параметра ΔP. Это управление будит условно оптимальным m-м шагом относительно состояния выходного параметра P_{m-1} (на шаге $m-1$). В результате выполнения найденного управления выходного параметра РЭА переводится в состояние P_{m-1} и т.д.

Оптимальная стратегия регулировки РЭА представляет собой траекторию движения от состояния P_{m-6} к P_m. Другие возможности стратегии регулировки не будут оптимальными. Найденную методом динамического программирования стратегию регулировки можно представить в виде диаграммы.

Метод динамического программирования при сложной поверхности функции выходного параметра становится менее эффективным и в ряде случаев не позволяет осуществить выход в область основного экстремума.

Градиентные методы предусматривают движение к экстремуму функции выходного параметра из некоторой начальной точки в направлении градиента.

Регулировка выполняется путем подбора элементов аппаратуры, влияющих на выходные параметры, как непрерывно, так и дискретно.

Дискретная регулировка используется в тех случаях, когда требуется компенсировать вполне определенное значение выходного параметра и связь выходного параметра и параметра регулировочного элемента определена.

Непрерывная или плавная регулировка предлагает возможность задания уровней выходного параметра через малые значения параметра регулировочного элемента, определенные чувствительностью измерительной аппаратуры.

Регулировочные элементы могут быть зависимыми и независимыми. В случае зависимых элементов порядок выполнения операций регулировки должен быть строго определен.

7.2. Методы тестирования печатных плат. Выбор стратегии контроля

Согласно Концепции развития радиоэлектронного комплекса Российской Федерации качеству и надежности радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), производящейся для государственных заказчиков, уделяется первостепенное значение.

Высокая трудоемкость проведения ремонтов приборов на всех этапах их изготовления повышает себестоимость и отпускную цену приборов, снижая конкурентоспособность выпускаемой продукции на рынке. Проведение ремонтов, связанных с неоднократной заменой компонентов, снижает надежность приборов и увеличивает вероятность проведения гарантийных ремонтов потребителем. Учитывая широкую географию продаж, затраты на проведение подобных ремонтов могут быть настолько значительны, что сделают производство убыточным, особенно при увеличении гарантийных сроков. Снижение качества и надежности выпускаемой продукции подрывает авторитет производителя и снижает стоимость торговой марки, что, в свою очередь, уменьшает прибыль.

Цель – разработать и внедрить технологию, обеспечивающую запланированные (расчетные) уровни качества и надежности выпускаемой продукции при минимальных (оптимальных) затратах.

Качество – степень соответствия совокупности присущих характеристик требованиям.

Продукция – результат процесса.

Процесс – совокупность взаимосвязанных или взаимодействующих видов деятельности (ГОСТ Р ИСО 9000–2001 «Основные положения и словарь»).

Качество продукции – совокупность свойств продукции, обусловливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением (ГОСТ 15467–79 «Управление качеством продукции. Основные понятия»).

Надежность – 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, ремонтопригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств (ГОСТ 27002–89 «Надежность в технике»).

Качество товара представляет собой соответствие товара требованиям нормативной и технической документации (Учебник по системе менеджмента качества).

Надежность изделия – свойство изделия сохранять значения установленных параметров функционирования в определенных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, хранения и транспортирования (Учебник по системе менеджмента качества). Постоянно проводимые исследования качества изготовления приборов в консультационно-технологическом центре ЗАО «Предприятие "Остек"» выявили три основных группы дефектов, связанных:

- с ошибками разработчиков и конструкторов (рис. 142, 143);
- отказом несоответствующих комплектующих и компонентов (рис. 144–150);
- отклонениями в технологии изготовления печатных узлов (рис. 151).

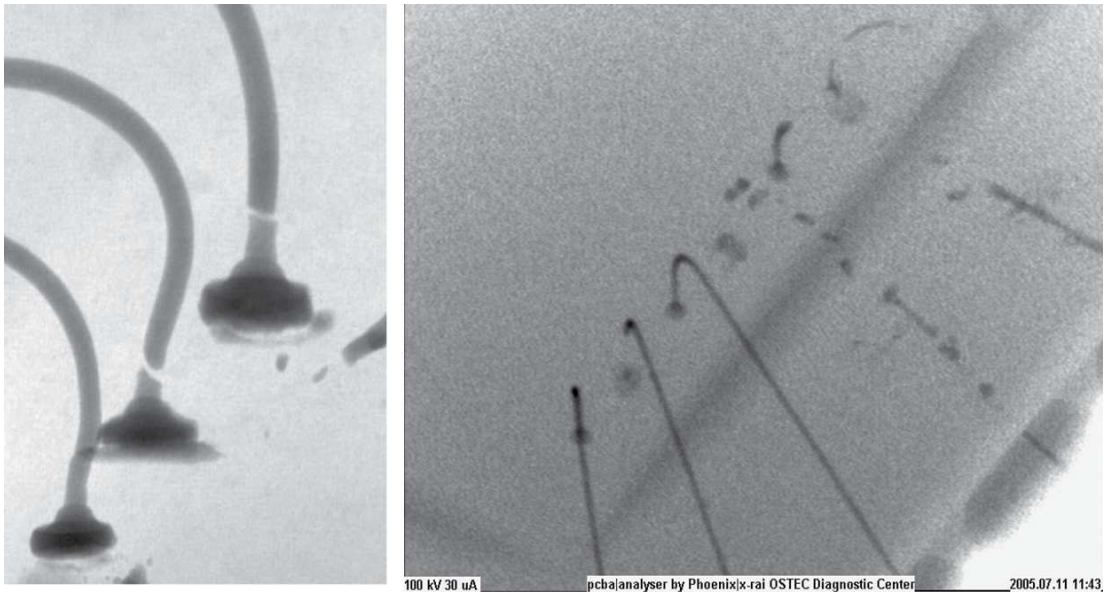


Рис. 142. Отказы приборов, связанные с ошибками разработчиков (схемотехников) – разрушение соединительных проводников: при перегрузке по току (слева), при перегрузке по напряжению (справа)

Дефекты, показанные на рис. 143, гарантируют неудовлетворительное качество паяных соединений и, как следствие, невозможность достижения запланированных уровней качества и надежности выпускаемой продукции.

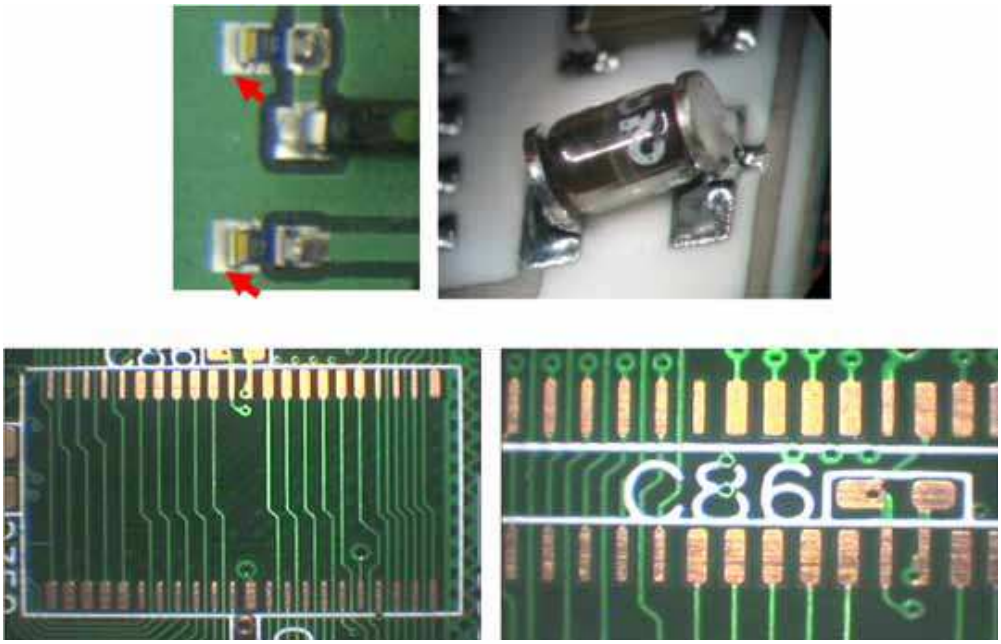


Рис. 143. Характерные дефекты, связанные с ошибками конструкторов: расположение контактных площадок на шинах питания (слева вверху), некорректная форма контактных площадок (справа вверху)

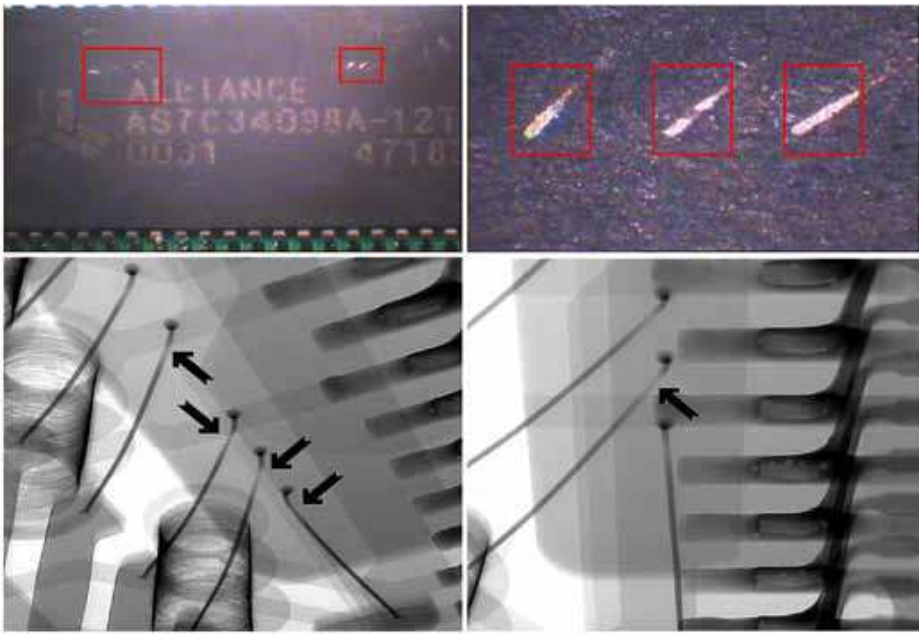


Рис. 144. Соединительные проводники на поверхности корпуса (вверху) и, как следствие, уменьшение их толщины за счет деформации при корпусировании (внизу) – одна из причин отказов электронных приборов

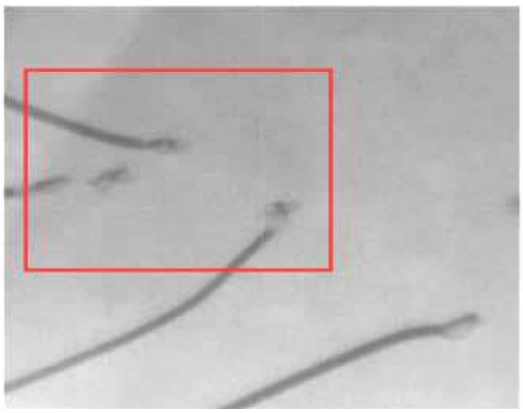


Рис. 145. Некачественные сварные соединения: соединительный проводник-кристалл и соединительный проводник-рамка

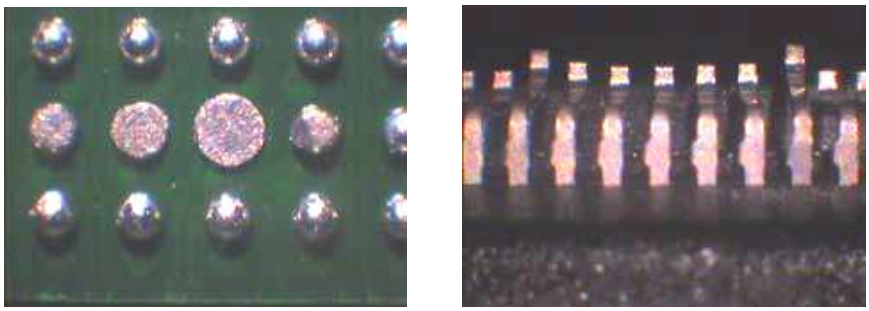


Рис. 146. Деформированные выводы интегральных микросхем – одна из наиболее вероятных причин низкого качества и надежности паяных соединений печатных узлов и увеличения трудоемкости проведения ремонтов в процессе производства и эксплуатации

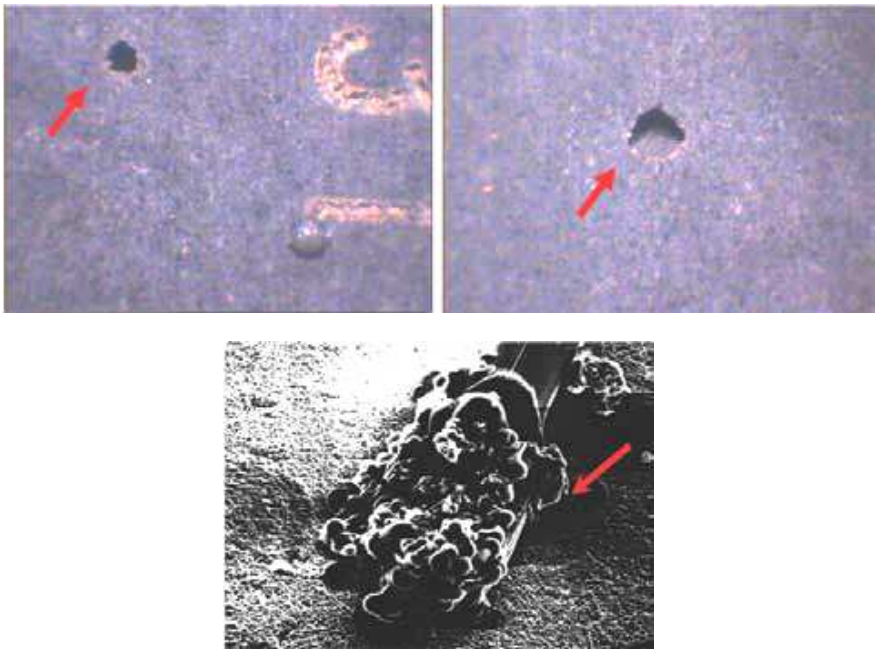


Рис. 147. Трещины, каверны и раковины в корпусах интегральных микросхем (вверху) – одна из наиболее вероятных причин возникновения коррозии (внизу)

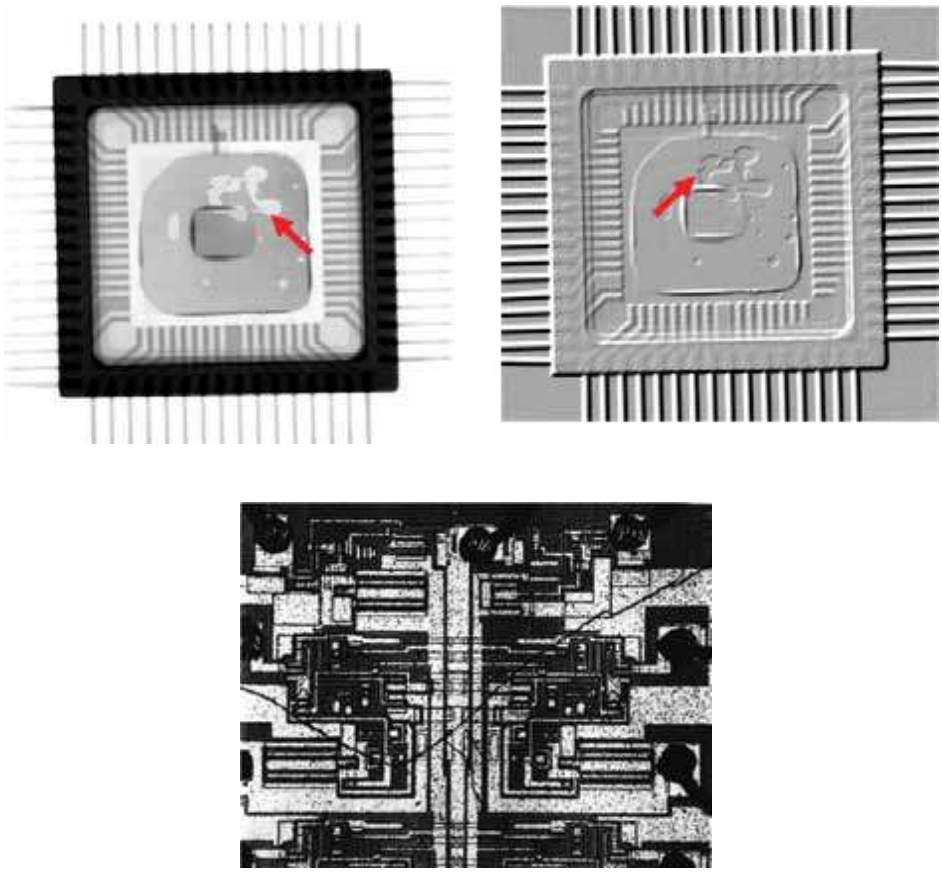


Рис. 148. Увеличенное количество пустот между кристаллом и подложкой (вверху) – одна из наиболее вероятных причин возникновения микротрещин кристалла в процессе оплавления. Вероятность возникновения дефектов указанного типа значительно повышается при несоблюдении условий хранения компонентов и технологических режимов пайки

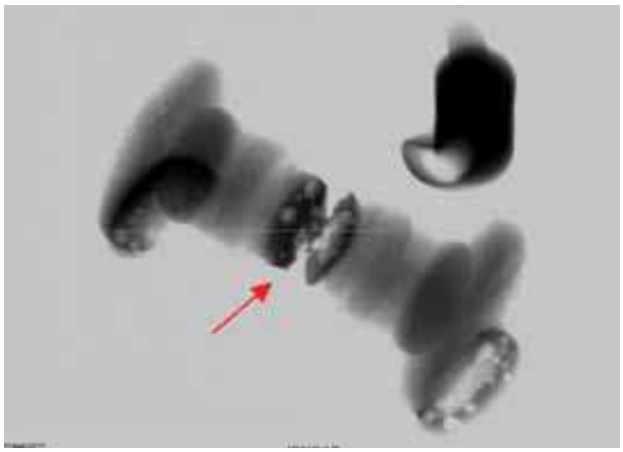


Рис. 149. Дефектный компонент – неудовлетворительное качество эвтектической пайки

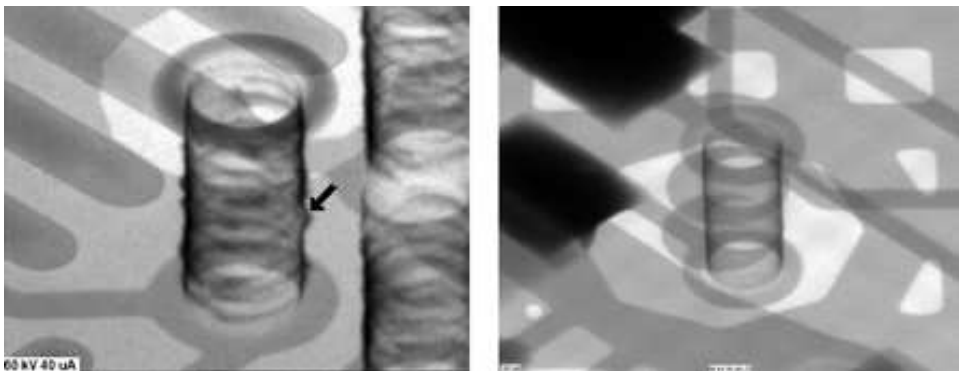
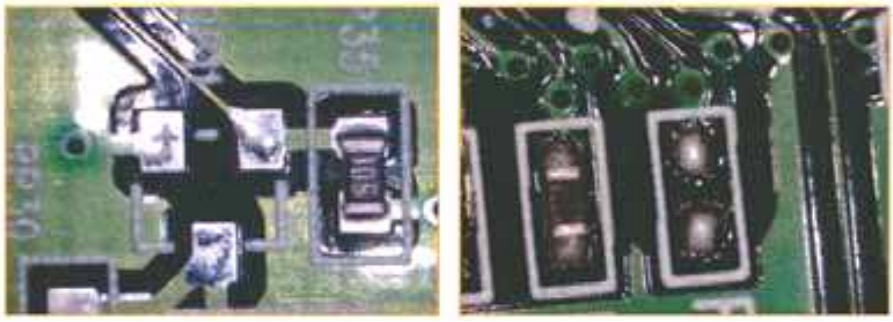
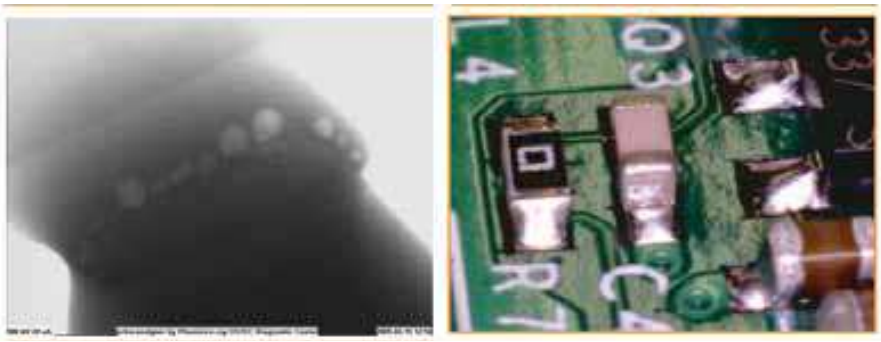


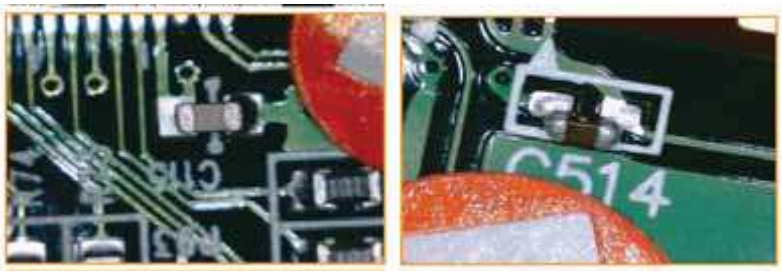
Рис. 150. Характерные дефекты печатных плат:
неудовлетворительное качество металлизации переходных отверстий (слева), выход отверстия за границы контактной площадки (справа)



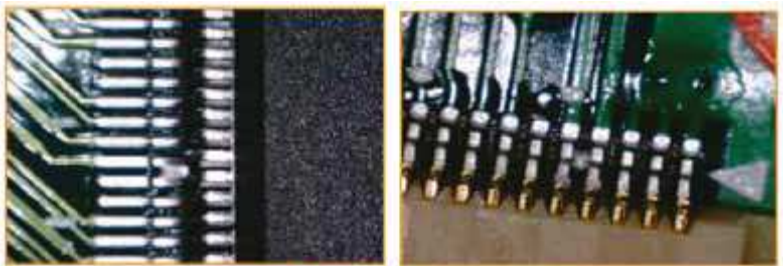
Отсутствие компонентов



Низкое качество и надежность паяного соединения



Неудовлетворительная паяемость вывода компонента



Подъем края компонента



Недостаточное количество припоя и смещение компонента

Рис. 151. Технологические дефекты

Стоимость устранения дефектов тем ниже, чем раньше он обнаружен, поэтому:

- ошибки разработчиков должны быть устранены на этапе проведения лабораторных испытаний до постановки изделий на серийное производство;
- несоответствующие компоненты, комплектующие и материалы должны быть отбракованы на этапе проведения квалификации и входного контроля;
- для снижения себестоимости выпускаемой продукции в процессе производства и обеспечения запланированных уровней качества и надежности необходима оптимизация затрат на проведение ремонта в процессе производства.

Запланированный уровень качества и надежности выпускаемой продукции является величиной расчетной и определяется максимально допустимой стоимостью ремонтов, которые предполагается провести в гарантийный период в зависимости от требований потребителя, условий эксплуатации выпускаемой продукции и стратегии проведения гарантийных ремонтов. Например, если потребитель при заключении договора на поставку 10 тыс. приборов требует, чтобы гарантийный срок составлял 10 лет, география использования включает всю территорию России, а ремонт предпола-

гается проводить силами предприятия-изготовителя, нетрудно подсчитать, что при уровне отказов в 1 % необходимо будет совершить 100 выездов для проведения гарантийных ремонтов. Затраты на проведение гарантийных ремонтов планируются, как правило, на уровне 2–4 % от отпускной цены. Если прибор стоит 100 тыс. руб., то на проведение ремонтов всей партии может быть запланирована сумма в 3 млн руб. Это значит, что в среднем на одну командировку может быть затрачено 30 тыс. руб. Если указанные приборы будут эксплуатироваться преимущественно в Западной Сибири и на Дальнем Востоке, запланированных средств будет явно недостаточно. Если приборы стоят 10 тыс. руб., а в партии – 100 тыс. шт., ситуация резко усугубляется, так как планируемые затраты на проведение гарантийных ремонтов возрастут десятикратно и могут превысить запланированный уровень прибыли. Повышение отпускной цены для компенсации указанных затрат будет снижать конкурентоспособность выпускаемой продукции и может стать препятствием для заключения выгодного контракта. Учитывая все вышесказанное, становится понятным наиболее часто встречающееся значение планируемого уровня дефектности: 0,1 % или 1000 ppm.

Используя данные приведенных выше примеров, попробуем рассчитать максимальные затраты на ремонт в процессе производства.

Если в структуре цены прибора (100 тыс. руб.) прибыль составляет 20 %, то себестоимость равна 80 тыс. руб.

В структуре себестоимости компоненты, комплектующие и материалы составляют 70 % (величина, характерная при производстве электронных приборов), а работы – 30 % (24 тыс. руб.). Допустим, прибор имеет одноплатную конструкцию с 1000 компонентов и 3000 паяных соединений.

При использовании первоклассного сборочного оборудования максимально достижимый уровень дефектности составляет 100 ppm в середине большой партии. В этом случае на партии в 10 тыс. шт. печатных узлов мы получим: 3 000·10 000·100/1 000 000 = 3000 потенциально дефектных паяных соединений.

Кроме того, первоклассные поставщики и производители электронных компонентов гарантируют уровень дефектности 10 ppm. Это означает, что в партии в 10 тыс. шт. мы получим: 1 000·10 000·10/1 000 000 = 100 потенциально дефектных компонентов.

Это означает, что 31 % спаянных печатных узлов будет иметь потенциальные дефекты.

Трудоемкость диагностики и локализации дефекта на электронном модуле, имеющем 1000 компонентов, в среднем составляет не менее 4 ч. При стоимости нормо-часа для высококвалифицированного специалиста на уровне 25 долл. США (с учетом накладных расходов) затраты на ремонт при выпуске партии указанных приборов без средств автоматической диагностики и локализации дефектов составят: 3 100·4·25 = 310 000 долл. США или около 10 000 000 руб.

Средние минимальные затраты на ремонт одного прибора составят: 10 000 000/10 000 = 1000 руб.

Более того, указанные расчеты справедливы, если все печатные узлы будут обработаны в одной партии, так как в начале и конце уровень дефектности, как правило, в несколько раз выше (в начале партии необходимо устранить последствия ошибок операторов, несоответствующих компонентов и комплектующих, а в конце партии – нехватки компонентов).

Кроме того, самый квалифицированный наладчик/регулировщик и самый добросовестный контролер не в состоянии в полном объеме проверить выпускаемую продукцию на соответствие ее конструкторской и нормативной документации. Как результат – дополнительные затраты на ремонт приборов, отказавших в процессе приемо-сдаточных испытаний и у потребителя в гарантийный период.

Методика достижения запланированного уровня качества и надежности.

Приведенные выше примеры наглядно подтверждают известный постулат: «Стоимость устранения дефекта тем ниже, чем ближе к месту его потенциального возникновения он обнаружен». А это означает, что необходимо добиваться выпуска качественной и надежной продукции на заводе-изготовителе. Вопрос второй: «Какая технология обеспечивает достижение запланированных уровней качества и надежности и какие затраты для этого нужны?». Итак, мы определили цель: разработать и внедрить технологию, обеспечивающую запланированные (расчетные) уровни качества и надежности выпускаемой продукции при минимальных (оптимальных) затратах.

Рассмотрим пример: на предприятии внедрен типовой технологический процесс сборки печатных узлов (рис. 152).



Рис. 152. Схема технологического процесса сборки печатных узлов без систем контроля и инспекции



Рис. 153. Алгоритм процесса достижения запланированного уровня качества выпускаемой продукции

Алгоритм процесса достижения запланированного уровня качества выпускаемой продукции (рис. 153) включает следующую последовательность действий:

- сбор статистических данных о дефектах;
- классификация выявленных дефектов;

• выявление наиболее значимых типов дефектов;

• внедрение наиболее эффективных средств диагностики и локализации дефектов для снижения стоимости ремонтов;

• анализ эффективности проводимых преобразований;

• разработка и внедрение корректирующих и предупреждающих воздействий.

Сбор, классификация и анализ статистических данных по обнаруженным на операции выходного функционального контроля дефектам выявили наиболее значимый тип – увеличенное количество пустот в паяных соединениях (рис. 154). Наиболее эффективное средство диагностики и локализации дефектов указанного типа – рентгеновская инспекция. Приведенная диаграмма (см. рис. 154) наглядно демонстрирует снижение количества дефектов, связанных с пустотами в паяных соединениях после внедрения системы рентгеновской инспекции. В соответствии с предложенным алгоритмом, принятые преобразования по диагностике и локализации указанного типа дефектов можно считать удовлетворительными.



Рис. 154. Снижение уровня дефектности выпускаемой продукции при последовательном внедрении автоматических систем инспекции и контроля

Вторым по значимости типом дефекта является «Неточное совмещение вывода компонента с контактными площадками». Наиболее эффективным средством диагностики и локализации дефек-

тов указанного типа является автоматическая оптическая инспекция. При этом выбираемые системы АОИ должны легко настраиваться на работу в соответствии с требованиями соответствующих стандартов. Только в этом случае возможно выполнение контроля качества выпускаемой продукции на соответствие ее требованиям нормативной документации.

После внедрения системы АОИ контроля качества монтажа и паяных соединений количество дефектов изделий, связанных со смещением выводов компонентов относительно контактных площадок на печатной плате, значительно сократилось. В соответствии с предложенным алгоритмом (см. рис. 153), принятые преобразования по диагностике и локализации указанного типа дефектов можно считать удовлетворительными.

Следующим по значимости типом дефекта является «Установлен несоответствующий компонент». Наиболее вероятными причинами установки несоответствующего компонента могут быть:

- ошибка оператора при снаряжении питателя;
- дефектный компонент (брак производителя);
- повреждение компонента в процессе изготовления (технологический дефект).

Наиболее эффективным средством диагностики и локализации дефектов указанного типа является автоматический внутрисхемный контроль. Учитывая высокую плотность монтажа выпускаемых изделий и большую их номенклатуру, в качестве средства для проведения автоматического внутрисхемного электрического контроля была выбрана система SPEA4060 (рис. 155).



Рис. 155. Схема технологического процесса сборки печатных узлов при внедрении современных автоматических систем инспекции и контроля

После внедрения системы автоматического внутрисхемного контроля SPEA 4060 количество дефектов изделий, связанных с установкой несоответствующего компонента, значительно сократилось. В соответствии с предложенным алгоритмом (см. рис. 153) принятые преобразования по диагностике и локализации указанного типа дефектов можно считать удовлетворительными.

Следующим по значимости типом дефекта является «Недостаточный объем припоя в паяных соединениях». Наиболее вероятными причинами неудовлетворительного количества припоя могут быть:

- некорректные размеры контактных площадок (ошибка конструктора);
- некорректные размеры апертур (ошибка конструктора);
- неудовлетворительное качество трафарета (дефект производителя трафарета);
- неудовлетворительное качество паяльной пасты (дефект поставщика и/или производителя);
- неудовлетворительное качество подготовки паяльной пасты к работе (технологический дефект);
- некорректные параметры настройки устройства трафаретной печати (скорость перемещения и/или усилие прижима ракеля);
- коробление печатной платы.

Ошибки конструкторов должны быть выявлены на этапах приемки конструкторской документации, технологической подготовки производства и изготовления опытных образцов – до постановки изделия на серийное производство. Качество трафарета, паяльной пасты и печатных плат должно контролироваться при входном контроле.

Качество нанесения паяльной пасты для различных областей применения регламентируется соответствующими стандартами.

Наиболее эффективным средством инспекции качества нанесения паяльной пасты являются современные системы АОИ, обеспечивающие контроль положения (2D контроль) и объема (2D+3D контроль) для столбика (отпечатка) на каждой контактной площадке печатной платы.

После внедрения системы АОИ контроля качества нанесения паяльной пасты (см. рис. 155) количество дефектов изделий, связанных с неудовлетворительным количеством припоя в паяных соедине-

ниях, значительно сократилось. В соответствии с предложенным алгоритмом, принятые преобразования по диагностике и локализации указанного типа дефектов можно считать удовлетворительными.

Указанная последовательность действий (см. рис. 153) повторяется до тех пор, пока не будет достигнут требуемый уровень качества (дефектности изделий при приемке).

Необходимо отметить, что требуемый результат был достигнут для конкретного изделия в конкретной партии.

Для современного электронного производства последовательность операций, описанных предложенным алгоритмом, выполняется перманентно: только в этом случае могут быть гарантированы условия непрерывного контроля технических характеристик выпускаемых изделий, параметров технологических процессов и их постоянных улучшений.

Необходимо отметить еще один очень важный момент: цель была достигнута по критерию максимального количества дефектов при приемке (1000 ppm). При этом внедрение систем автоматической инспекции и контроля не уменьшило количества дефектов, а резко снизило стоимость проведения ремонтов за счет быстрой диагностики и точной локализации. При этом численность персонала, необходимого для выполнения ремонтов в процессе производства, сократить не удастся. Сократится количество высококвалифицированных специалистов, способных заниматься диагностикой дефектов в отсутствии современного автоматического инспекционного и контрольно-измерительного оборудования. Но при выходе из строя любой из применяемых единиц контрольно-измерительного или инспекционного оборудования количество дефектных изделий и трудоемкость ремонта автоматически возрастут. Для снижения количества дефектов необходимы определение, устранение и предупреждение причин их возникновения.

Для предупреждения поступления в производство дефектных (несоответствующих по электрическим параметрам) компонентов, комплектующих и материалов (ККМ) традиционным является следующий набор действий:

- разработка, внедрение и поддержание в актуальном состоянии нормативных документов (например, СТП), регламентирующих применение ККМ (ограничительных перечней);
- организация постоянной работы по квалификации производителей и поставщиков ККМ для поддержания ограничительных перечней в актуальном состоянии;

• при приемке конструкторской документации контролировать применение только ККМ, включенных в утвержденный ограничительный перечень;

• организация проведения входного контроля ККМ в соответствии с программами (методиками), разработанными в процессе квалификации;

• обеспечение маркировки носителей ККМ (катушек, пеналов, поддонов), успешно прошедших входной контроль для последующей их идентификации при комплектации и снаряжении питателей сборочных автоматов;

• организация системы прослеживаемости используемых ККМ, позволяющей: вести статистику отказов компонентов с точностью до носителя (поставщика, производителя), что поможет (в случае обнаружения систематических дефектов) вернуть все печатные узлы для замены дефектных компонентов; оценивать качество работы производителей и поставщиков и ограничивать (запрещать) закупку ККМ в случае систематического несоответствия их технической и нормативной документации и условиям контрактов (договоров);

• постоянный контроль всех выпускаемых печатных узлов с помощью автоматической системы электрического внутрисхемного контроля для проверки соответствия выпускаемой продукции требованиям конструкторской документации и отсутствия повреждения электронных компонентов в процессе монтажа и оплавления.

При проведении указанных мероприятий резко снизится количество дефектов, связанных с несоответствующими компонентами, что позволит сократить трудоемкость и затраты на проведение ремонтов в процессе производства.

Для предупреждения количества технологических дефектов, связанных с неудовлетворительным объемом припоя в паяных соединениях, как правило, используется следующий набор мероприятий:

• разработка, внедрение и проведение постоянной работы по поддержанию в актуальном состоянии базы данных компонентов (Стандарта предприятия) для обеспечения корректных размеров контактных площадок и апертур трафаретов;

• обязательное проведение технического контроля конструкторской документации (на новые и модифицируемые изделия) в части соответствия размеров и формы контактных площадок установленным и утвержденным в СТП;

• проведение квалификации производителей трафаретов. В дальнейшем трафареты должны заказываться только у производителей, прошедших квалификацию;

• обязательное проведение входного контроля новых трафаретов, полученных от производителя в соответствии с утвержденной инструкцией по установленным критериям: размеры апертур, толщина, чистота обработки граней апертур (отсутствие зубцов);

• обязательное проведение контроля качества отмывки трафарета после использования и при подготовке к работе;

• обеспечение контроля соблюдения утвержденной технологической инструкции по хранению и подготовке паяльной пасты к работе;

• обеспечение инспекции качества финишного покрытия печатных плат на этапе входного контроля (состав, толщина, равномерность, шероховатость, паяемость);

• обеспечение контроля чистоты поверхности (и/или организация очистки от пыли) печатных плат перед загрузкой в устройство трафаретной печати (принтер);

• проведение сплошного контроля соответствия объема паяльной пасты расчетным значениям (произведение площади апертуры на толщину трафарета) и требованиям соответствующих стандартов с помощью системы автоматической оптической инспекции (см. рис. 151);

• при появлении систематических дефектов обеспечить остановку процесса до устранения причин несоответствий;

• для ускорения реакции при появлении потенциальных дефектов организовать петлю локальной обратной связи (рис. 156).

Необходимо учесть, что дефекты, связанные со смещением выводов компонентов относительно контактных площадок в большинстве случаев не оказывают влияния на работоспособность приборов, но при этом увеличивается вероятность появления отказов в процессе проведения приемо-сдаточных испытаний или у потребителя. В первом случае резко возрастает трудоемкость проведения ремонтов, связанная с увеличением времени на диагностику и локализацию дефектов (особенно при использовании влагозащитных покрытий). Во втором случае затраты на проведение ремонта у потребителя подрывают его репутацию и вообще могут сделать производство убыточным из-за дополнительных непредвиденных затрат (например, на командировочные расходы).



Рис. 156. Использование локальных петель обратной связи, позволяющее резко сократить время реакции и минимизировать количество технологических дефектов, связанных с неудовлетворительным количеством припоя в паяных соединениях

Переход к стратегии предупреждения дефектов, связанных со смещением выводов компонентов относительно контактных площадок (в соответствии с требованиями стандартов), должен предусматривать целый комплекс мероприятий, снижающих вероятность их возникновения, включая:

- обеспечение выполнения персоналом процедур, связанных с запуском оборудования;
- обеспечение высокого качества проведения технического обслуживания технологического оборудования.

Например, техническое обслуживание сборочного автомата должно проводиться квалифицированным техническим персоналом, прошедшим обучение на фирме-изготовителе оборудования и имеющим соответствующие документы:

- обеспечение проведения регулярной калибровки технологического оборудования (сборочного автомата) с обязательной отметкой результатов в формуляре;
- обеспечение регулярного проведения контроля точности монтажа компонентов до и/или после оплавления (на выполнение требований соответствующих стандартов) методом автоматической оптической инспекции;
- обеспечение остановки процесса сборки при появлении систематических дефектов до устранения причин несоответствий.

Переход к стратегии предупреждения дефектов, связанных с установкой несоответствующих компонентов, должен предусматривать целый комплекс мероприятий, снижающих вероятность их возникновения, включая:

- обеспечение разработки, внедрения и постоянной работы по поддержанию в актуальном состоянии ограничительного перечня компонентов (Стандарта предприятия) для гарантии использования только компонентов, разрешенных к применению и поставляемых сертифицированными поставщиками;
- обеспечение проведения постоянной работы по квалификации компонентов, их производителей и поставщиков;
- обеспечение проведения входного контроля компонентов, комплектующих и материалов в соответствии с программами (методиками), разработанными в процессе квалификации;
- внедрение операции маркирования компонентов (печатных плат, катушек, пеналов и поддонов) для последующей их идентификации при хранении, учете и комплектации заказов;
- внедрение системы прослеживаемости устанавливаемых компонентов на базе современных сборочных автоматов с интеллектуальными питателями для исключения ошибок оператора;
- обеспечение проведения проверки соответствия устанавливаемых компонентов конструкторской документации с помощью системы автоматического внутрисхемного контроля;
- при появлении систематических дефектов процесс сборки должен быть остановлен до устранения причин несоответствий.

После достижения запланированного уровня качества необходимо обеспечить поддержание параметров технологического процесса для сохранения достигнутых результатов. Постоянство параметров технологического процесса – необходимое условие повторяемости технических характеристик выпускаемых изделий.

7.2.1. Взаимосвязь показателей контролепригодности с характеристиками радиоэлектронных средств

Обеспечение контролепригодности РЭС предполагает учет особенностей задач, решаемых аппаратурой, условия ее функционирования, организации технического обслуживания, характеристик, особенностей программного обеспечения и др. (табл. 39).

Таблица 39

Классификация показателей контролепригодности

Показатели контролепригодности	ТЭЗ	Стойка	РЭС
ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ :			
$K_{гп}$ – коэффициент глубины поиска дефекта	+	+	+
$K_{уп}$ – коэффициент унификации параметров	+	+	+
Д – вероятность правильного диагностирования	+	+	+
$K_{ок}$ – коэффициент оперативности самопроверки РЭС	+	+	+
$K_{лн}$ – коэффициент однозначности локализации неисправности	–	+	+
$K_{апс}$ – коэффициент автоматизации программы проверки РЭС	–	+	+
$K_{укп}$ – коэффициент унификации количества контролируемых параметров РЭС	+	+	+
КОНСТРУКТИВНЫЕ :			
$K_{ис}$ – коэффициент использования специальных средств диагностирования	–	+	+
$K_{ус}$ – коэффициент унификации устройств сопряжения	–	–	+
$K_{п}^{эра}$ – коэффициент избыточности памяти РЭС	–	+	+
$K_{и}$ – коэффициент аппаратурной избыточности	+	+	+
$K_{аги}$ – коэффициент автоматизации съема диагностической информации	–	+	+
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ :			
$K_{тд}$ – коэффициент средней трудоемкости подготовки РЭС к проверке	+	+	+
$K_{вср}$ – коэффициент влияния стыковочно-расстыковочных операций	–	–	+

Существуют следующие показатели контролепригодности:

- коэффициент глубины поиска дефекта ($K_{гп}$);
- коэффициент унификации параметров сигналов ($K_{уп}$);
- вероятность правильного диагностирования или достоверность контроля (Д);

- коэффициент оперативности контроля РЭС ($K_{\text{ок}}$);
- коэффициент однозначности локализации места неисправности ($K_{\text{лн}}$);
- коэффициент автоматизации программы самопроверки РЭС ($K_{\text{апс}}$);
- коэффициент унификации контролируемых параметров ($K_{\text{укп}}$);
- коэффициент использования специальных средств диагностирования ($K_{\text{ис}}$);
- коэффициент унификации устройств сопряжения ($K_{\text{ус}}$);
- коэффициент избыточности памяти РЭС ($K_{\text{п}}^{\text{эра}}$);
- коэффициент аппаратурной избыточности РЭС ($K_{\text{и}}$);
- коэффициент автоматизации съема диагностической информации ($K_{\text{аги}}$);
- коэффициент средней трудоемкости подготовки РЭС к проверке ($K_{\text{тд}}$);
- коэффициент влияния стыковочно-расстыковочных операций ($K_{\text{âñð}}$), используя которые, можно оценить приспособленность РЭС к техническому диагностированию.

Показатели контролепригодности принимают значения от 0 до 1, причем 0 соответствует минимальному значению, а 1 – максимальному.

В качестве эксплуатационных характеристик РЭС будем рассматривать: погрешность измерения параметра (δ); структурную избыточность ($S_{\text{изб}}$), которая вводится в виде дополнительных элементов для организации и проведения диагностирования; вероятность необнаруженного отказа ($P_{\text{но}}$); достоверность контроля (Д); время восстановления ($t_{\text{в}}$); вероятность безотказной работы ($P_{\text{бр}}$); стоимость РЭС (W).

Будем исходить из того, что РЭС построена по агрегативно-модульному принципу и конструктивно состоит из типовых элементов замены (ТЭЗ). Из набора ТЭЗ собирают стойку, а набор стоек представляет комплекс РЭС. Исходя из этого каждый конструктивный узел можно оценить по приспособленности к техническому

диагностированию, по совокупности показателей контролепригодности. Здесь «+» означает, что этот показатель используется для оценки уровня контролепригодности данной структуры РЭС, в противном случае – «–».

Каждая из структур РЭС (как дискретная, так и аналоговая) может быть подвергнута как тестовому, так и функциональному диагностированию. В зависимости от этого, к примеру, на уровне ТЭЗ, они представлены в табл. 40.

Таблица 40

Совокупность показателей контролепригодности на уровне ТЭЗ

Коэффициенты контролепригодности	Дискретные устройства		Аналоговые (гибридные) устройства	
	тестовое диагностирование	функциональное диагностирование	тестовое диагностирование	функцио-нальное диагностирование
$K_{гп}$	+	+	+	+
Д	–	+	–	+
$K_{ос}$	+	–	+	–
$K_{укп}$	–	–	+	–
$K_{и}$	+	+	+	+
$K_{тд}$	+	–	+	–

Для того, чтобы объективно задать требования по точности локализации места неисправности, необходимо построить график зависимости коэффициента однозначности локализации места неисправности ($K_{лн}$) от h_K и F (где h_K – число однозначно различимых неисправностей при диагностировании заменяемых составных частей РЭС на принятом уровне деления, а F – число заменяемых составных частей РЭС на принятом уровне деления, выявленных при контроле) (рис. 157).

Перед началом эскизного проектирования сменных узлов, стойки в техническом задании целесообразно задать, а затем контролировать выполнение значения таких показателей контролепригодности, как $K_{гп}$, $K_{аги}$, $K_{апс}$, $K_{уп}$, $K_{укп}$, Д, $K_{и}$.

Причем первые пять показателей контролепригодности необходимо стремиться задавать равными единице.

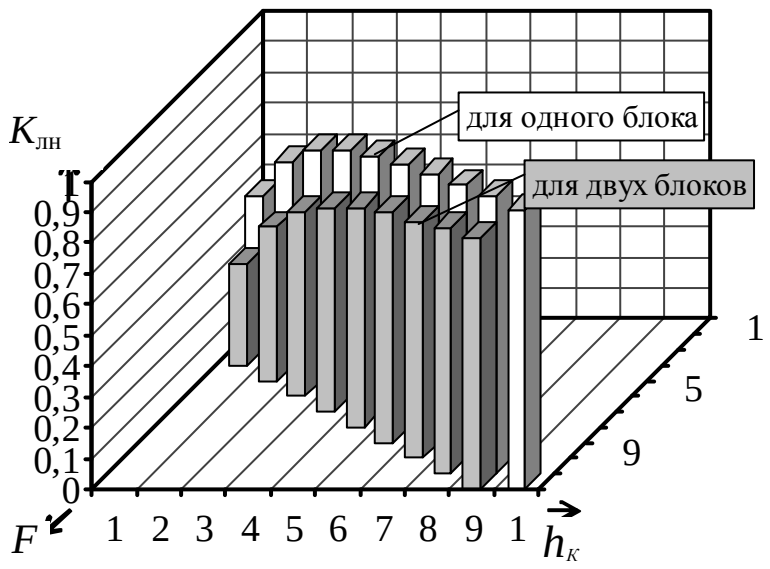


Рис. 157. Зависимость коэффициента однозначности локализации неисправности ($K_{лн}$) от h_K и F

В ходе эскизного проектирования должны рассчитываться $K_{лн}$ и $K_{ок}$.

На этапе испытания опытного образца определяются значения $K_{тд}$ и $K_{п}^{эра}$.

Значения всех составляющих коэффициентов контролепригодности были рассмотрены выше.

Если при оценке уровня контролепригодности РЭС выясняется, что полученный уровень не удовлетворяет заданным требованиям в техническом задании, разработчик прилагает усилия для того, чтобы их выполнить.

Рассмотрим на качественном уровне, как будут влиять изменения показателей контролепригодности на эксплуатационные характеристики.

Исследуем влияние изменения коэффициента глубины поиска дефекта $K_{гп} = \frac{F}{R}$. Значение F может определяться по таблице функций неисправностей или с помощью дешифрирующих зависимостей для диагностируемой структуры. Для комбинационных структур, выполненных по интегральной технологии, общее число одиночных неисправностей определим по формуле $R = 2n$, а кратных – $R = 3^n - 1$, где n – количество логических элементов.

Значению F соответствует определенное количество составных частей (элементов) РЭС N_F, неисправности которых обнаруживаются в результате диагностирования. Аналогично для R – N_R.

Если в спроектированной РЭС необходимо изменить (увеличить) значение $K_{\text{гп}}$, то это означает, что необходимо изменить (увеличить) количество обнаруживаемых в ней неисправностей. Это, как правило, требует введения дополнительных затрат, т.е. увеличения вводимой структурной избыточности $S_{\text{изб}}$. В свою очередь, увеличение значения $K_{\text{гп}}$, т.е. количества обнаруживаемых неисправных элементов N_F, приводит к уменьшению вероятности необнаруженного отказа $P_{\text{но}}$. Если принять, что достоверность контроля РЭС определяется по формуле

$$\text{Д} = 1 - (P_{\text{но}} + P_{\text{ло}}),$$

где $P_{\text{ло}}$ – вероятность ложного отказа, то это ведет к увеличению достоверности контроля. В свою очередь уменьшение значения $K_{\text{гп}}$ приводит к увеличению количества необнаруженных отказавших элементов и к уменьшению достоверности контроля. Повышение значения $K_{\text{гп}}$, как отмечалось выше, увязано со структурными дополнительными затратами, т.е. увеличением количества элементов в ТЭЗ, а это ведет к уменьшению вероятности безотказной работы ТЭЗ и к увеличению его стоимости.

Рассмотрим коэффициент оперативности контроля, который определяется исходя из следующего выражения:

$$K_{\text{ок}} = (t_C - t_K)/t_C,$$

где t_C – время непосредственной проверки всей РЭС; t_K – время проверки данной стойки ТЭЗ.

При $t_K \to 0$ $K_{\text{ок}} \to 1$.

В свою очередь t_K непосредственно связано с временем обнаружения неисправности $t_{\text{обн}}$, которое входит составной частью в выражение, определяющее время восстановления $t_{\text{в}}$:

$$t_{\text{â}} = t_{\text{î áí}} + t_{\text{î ò}} + t_{\text{ó}} + t_s + t_W,$$

где $t_{\text{от}}$ – время отыскания неисправности; $t_{\text{у}}$ – время устранения неисправности; t_s – время простоя до начала отыскания неисправности; t_W – время для повторного включения в работу после восстановления;

$$t_{от} = t_к + t_{лн},$$

где $t_{лн}$ – время локализации места неисправности (установления места неисправности).

Исходя из этого можно отметить, что увеличение $K_{ок}$ неразрывно связано с уменьшением $t_в$ (при одинаковых исходных данных). Время проверки стойки $t_к$ (ТЭЗ) будет зависеть от того, сколько необходимо реализовать входных воздействий, входящих в тест для проверки ТЭЗ с их эталонными значениями. Таким образом, можно отметить, что сокращение времени $t_к$ связано с уменьшением количества входных воздействий в тесте и количества эталонных выходных сигналов, которые следует хранить в памяти средств контроля. Это позволяет сократить объем памяти, необходимый для реализации программы проверки ТЭЗ, что в свою очередь приводит к сокращению аппаратной избыточности $S_{изб}$, уменьшению стоимости РЭС и к повышению ее надежности. Но это справедливо в том случае, если программа проверки «зашивается» в постоянную память средств контроля.

Рассмотрим влияние коэффициента однозначности локализации неисправности:

$$K_{лн} = \frac{h_K}{F}.$$

Значение h_K характеризует количество неразличимых неисправностей (когда нельзя установить место неисправности) в контролируемой РЭС (стойке, ТЭЗ). В таком случае время локализации неисправности $t_{лн}$ будет зависеть от значения h_K. При уменьшении h_K время локализации места неисправности увеличивается, что в свою очередь приводит к увеличению времени восстановления $t_в$. Увеличение $K_{лн}$ требует введения аппаратурных затрат, т.е. увеличения структурной избыточности $S_{изб}$. Это приводит к уменьшению вероятности безотказной работы РЭС и к увеличению ее стоимости.

Исходя из рассмотренного можно записать следующее приближенное выражение:

$$t_в \approx \xi \frac{1}{K_{лн}},$$

где ξ – коэффициент пропорциональности.

На рис. 158 приведен график зависимости $t_в$ от $K_{лн}$ при ξ = 1. Из графика видно, что изменения $K_{лн}$ от 1 до 0,6 к значительному увеличению времени восстановления не приводит. При $K_{лн} < 0{,}6$ происходит резкое увеличение времени восстановления.

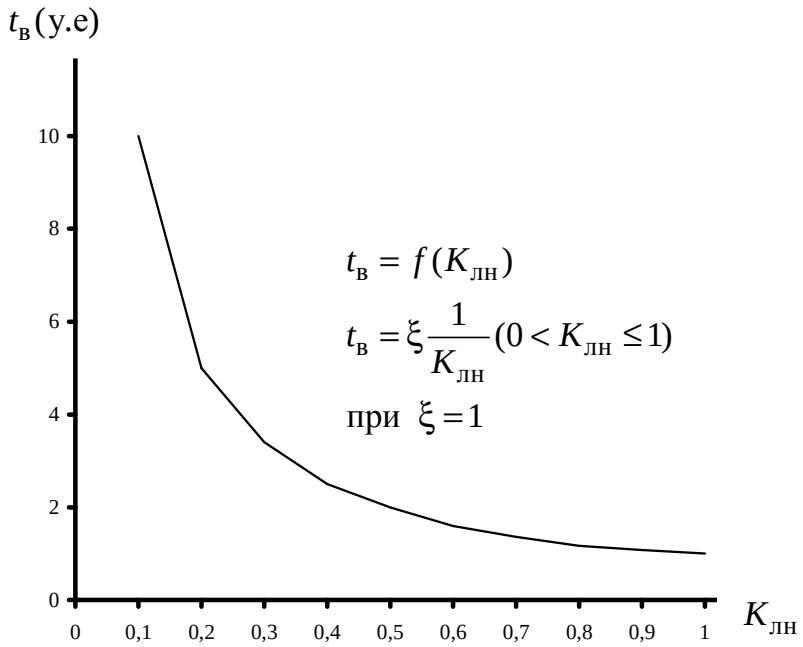


Рис. 158. График зависимости времени восстановления $t_в$ от значения коэффициента однозначности локализации неисправности ($K_{лн}$)

Рассмотрим влияние изменения коэффициента унификации устройств сопряжения:

$$K_{ус} = \frac{N_у}{N_0}.$$

Значение этого коэффициента рассчитывается, если $N_0 > 1$.

Если $K_{ус}$ принимает значение, равное единице, то это означает, что с помощью этого устройства сопряжения проверяется весь заданный класс РЭС.

Приближение $K_{ус}$ к 1 позволяет за счет уменьшения количества устройств сопряжения уменьшить стоимость РЭС и повысить ее надежность, уменьшить вводимую структурную избыточность.

Рассмотрим влияние изменения очередного показателя контролепригодности коэффициента унификации параметров сигналов:

$$K_{\text{уп}} = \frac{\delta_{\text{у}}}{\delta_0}.$$

В качестве унифицированных параметров могут быть использованы: постоянное напряжение, ток, частота, код, амплитудное значение переменного напряжения. Для образования параметров, используемых при диагностировании, в унифицированные параметры применяют первичные измерительные преобразователи (ПИП). Увеличение значения $K_{\text{уп}}$ неразрывно связано с уменьшением количества ПИП, т.е. с упрощением структуры РЭС, повышением вероятности ее безотказной работы, уменьшением погрешности измерения параметра.

Рассматривая аналогично остальные показатели контролепригодности, можно оценить их влияние на изменение погрешности измерения параметра, избыточность, достоверность, время восстановления, вероятность безотказной работы, стоимость. Результаты исследований приведены в табл. 41, где стрелка «↑» означает увеличение, возрастание показателя или величины, стоящей рядом со стрелкой, а стрелка «↓» означает уменьшение той или иной величины.

Таблица 41

Результаты исследований

Показатель контролепригодности	δ	$S_{\text{изб}}$	$P_{\text{но}}$	Д	$t_{\text{в}}$	$P_{\text{бр}}$	W
1	2	3	4	5	6	7	8
$K_{\text{гп}}\uparrow$	–	$S_{\text{изб}}\uparrow$	$P_{\text{но}}\downarrow$	Д↑	–	$P_{\text{бр}}\downarrow$	$W\uparrow$
$K_{\text{уп}}\uparrow$	–	$S_{\text{изб}}\downarrow$	–	–	–	$P_{\text{бр}}\uparrow$	$W\downarrow$
Д↑	δ↓	$S_{\text{изб}}\uparrow$	$P_{\text{но}}\downarrow$	–	–	$P_{\text{бр}}\downarrow$	$W\uparrow$
$K_{\text{ос}}\uparrow$	–	$S_{\text{изб}}\downarrow$	–	–	$t_{\text{в}}\downarrow$	$P_{\text{бр}}\uparrow$	$W\downarrow$
$K_{\text{лн}}\uparrow$	–	$S_{\text{изб}}\uparrow$	–	–	$t_{\text{в}}\downarrow$	$P_{\text{бр}}\downarrow$	$W\uparrow$
$K_{\text{апс}}\uparrow$	–	$S_{\text{изб}}\uparrow$	–	–	$t_{\text{в}}\downarrow$	$P_{\text{бр}}\downarrow$	$W\uparrow$
$K_{\text{укп}}\uparrow$	–	–	–	–	–	–	$W\downarrow$

Окончание табл. 41

1	2	3	4	5	6	7	8

$K_{ис}\uparrow$	–	$S_{изб}\downarrow$	–	–	$t_в\downarrow$	$P_{бр}\uparrow$	$W\downarrow$
$K_{ус}\uparrow$	–	$S_{изб}\downarrow$	–	–	–	$P_{бр}\uparrow$	$W\downarrow$
$K_п^{эра}\uparrow$	–	$S_{изб}\downarrow$	–	–	$t_в\downarrow$	$P_{бр}\uparrow$	$W\downarrow$
$K_и\downarrow$	$\delta\downarrow$	$S_{изб}\uparrow$	$P_{но}\downarrow$	Д$\uparrow$	$t_в\downarrow$	$P_{бр}\downarrow$	$W\uparrow$
$K_{аги}\uparrow$	–	$S_{изб}\uparrow$	–	–	$t_в\downarrow$	$P_{бр}\downarrow$	$W\uparrow$
$K_{тд}\uparrow$	–	–	–	–	$t_в\downarrow$	–	$W\downarrow$
$K_{вср}\uparrow$	–	$S_{изб}\downarrow$	–	–	$t_в\downarrow$	$P_{бр}\uparrow$	$W\downarrow$

Из табл. 40 можно сделать вывод, что изменение диагностических показателей приводит в основном к изменению избыточности, времени восстановления, вероятности безотказной работы и стоимости. Наиболее информативными диагностическими показателями являются коэффициент глубины поиска дефекта $K_{гп}$ и достоверность контроля. Наименее информативным показателем является коэффициент унификации контролируемых параметров $K_{укп}$, который влияет только на стоимость разрабатываемой РЭС. Если на стоимость РЭС существенных ограничений не накладывается, то этот показатель при расчетах контролепригодности можно не учитывать.

В табл. 40 можно выделить диагностические показатели контролепригодности, увеличение значений которых взаимосвязано с уменьшением времени восстановления – это $K_{ок}$, Д, $K_{лн}$, $K_{апс}$.

Конструктивные показатели контролепригодности, увеличение которых взаимосвязано с уменьшением времени восстановления – $K_{аги}$, $K_{ис}$, $K_и$, $K_п^{эра}$.

Изменение технологических показателей контролепригодности $K_{тд}$ и $K_{вср}$ в основном связано с изменением времени восстановления.

Вариация значений величины, характеризующей достоверность функционирования РЭС, связана с изменениями таких коэффициентов контролепригодности, как $K_{гп}$, Д, $K_и$. Значения этих показателей должны задаваться в техническом задании и жестко контролироваться на этапе проектирования.

Анализ табл. 41 позволяет выделить в ней две группы показателей контролепригодности, изменения значений которых приводят

к изменению структурной избыточности РЭС.

Первая группа: $K_{гп}$, $K_{лн}$, Д, $K_{апс}$, $K_{аги}$.

Вторая группа: $K_{ус}$, $K_{уп}$, $K_{ис}$, $K_{п}$, $K_{вср}$, $K_{и}$, $K_{ок}$.

Увеличение значения любого показателя контролепригодности из первой группы приводит к усложнению диагностируемой структуры. Увеличение значений показателей контролепригодности из второй группы имеет обратное действие.

По аналогии с этим можно выделить две группы показателей контролепригодности, изменение значений которых приводит к изменению значения вероятности безотказной работы диагностируемой структуры.

Первая группа: $K_{ок}$, $K_{ус}$, $K_{уп}$, $K_{ис}$, $K_{п}$, $K_{вср}$, $K_{и}$.

Вторая группа: $K_{гп}$, $K_{лн}$, $K_{апс}$, Д, $K_{аги}$.

Увеличение значения показателя контролепригодности в первой группе приводит к увеличению значения вероятности безотказной работы диагностируемой структуры, а увеличение показателей во второй группе имеет обратное действие.

Применяя метод выделения центрального ядра в матрице к табл. 37, можно выделить показатели контролепригодности, увеличение значений которых приводит к уменьшению вводимой структурной избыточности в диагностируемую структуру, к увеличению вероятности безотказной работы структуры и к сокращению времени восстановления структуры – это $K_{ок}$, $K_{уп}$, $K_{вср}$, $K_{ис}$.

На рис. 159 приведена зависимость уровня контролепригодности ($У_{п}$), приближенного уровня контролепригодности ($У_{пг}$) и диагностическая составляющая уровня контролепригодности ($У_{д}$) РЭС от изменения точности локализации неисправности, на рис. 160 – от времени самопроверки, на рис. 161 – от количества выявляемых неисправностей в РЭС. На рис. 162 приведены зависимость уровня контролепригодности ($У_{п}$), приближенного уровня контролепригодности ($У_{пг}$) и диагностическая составляющая уровня контролепригодности ($У_{д}$) РЭС от изменения времени подготовки к контролю.

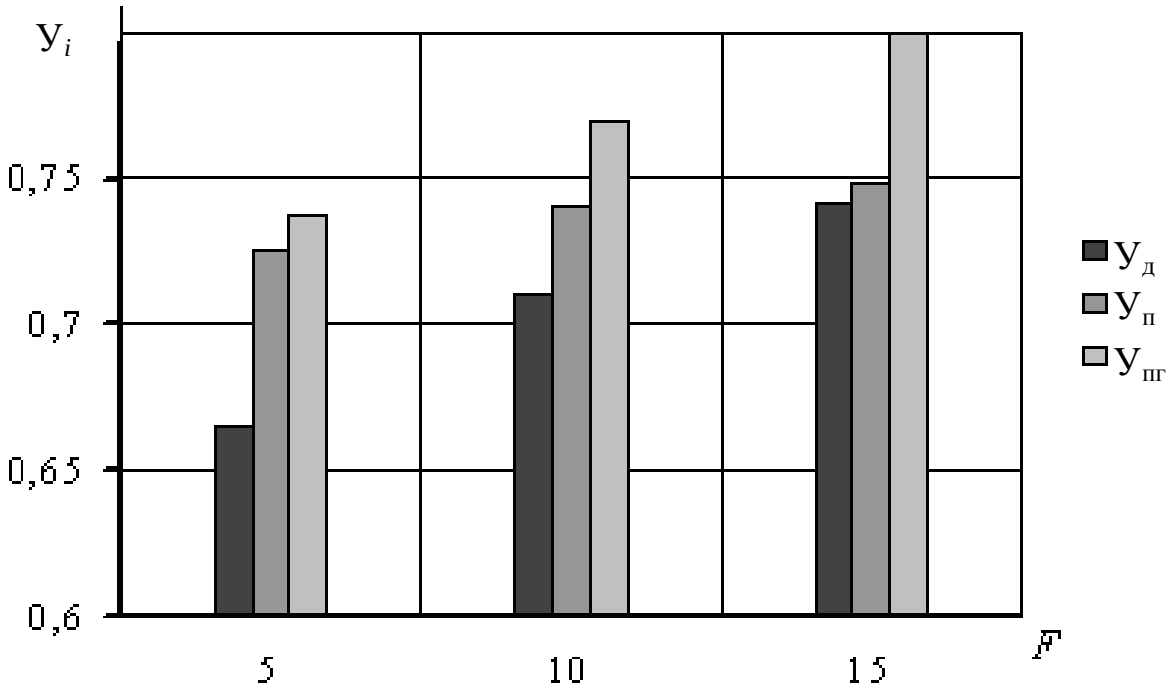


Рис. 159. Зависимость уровня контролепригодности РЭС
от количества выявляемых неисправностей

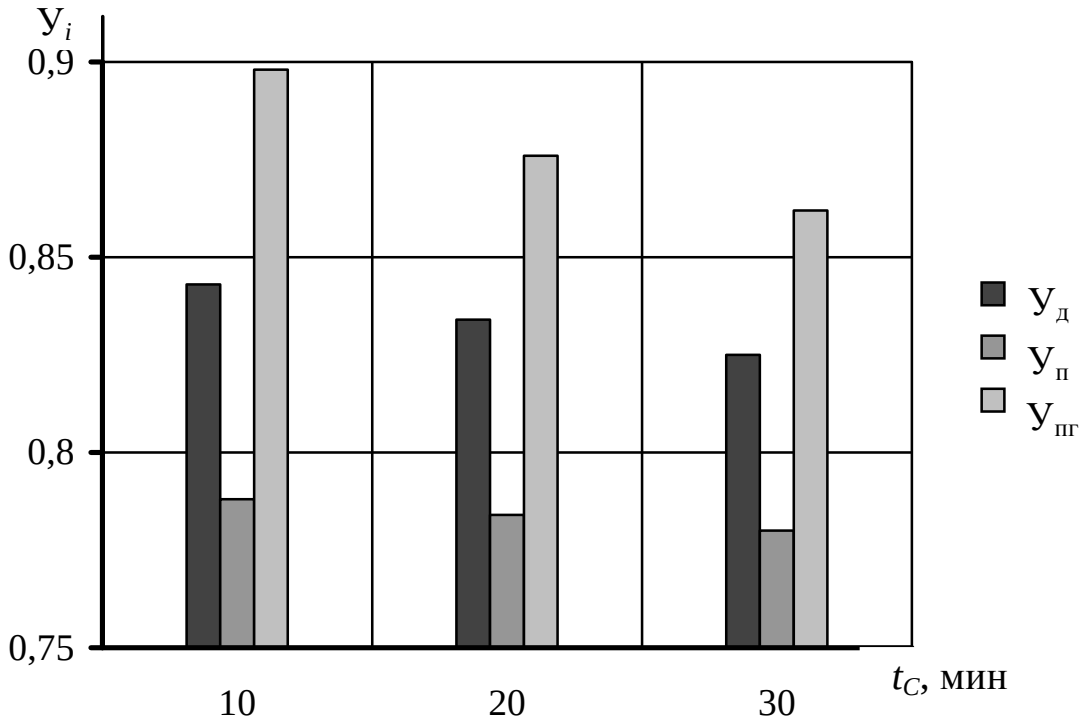


Рис. 160. Зависимость уровня контролепригодности РЭС
от времени самопроверки

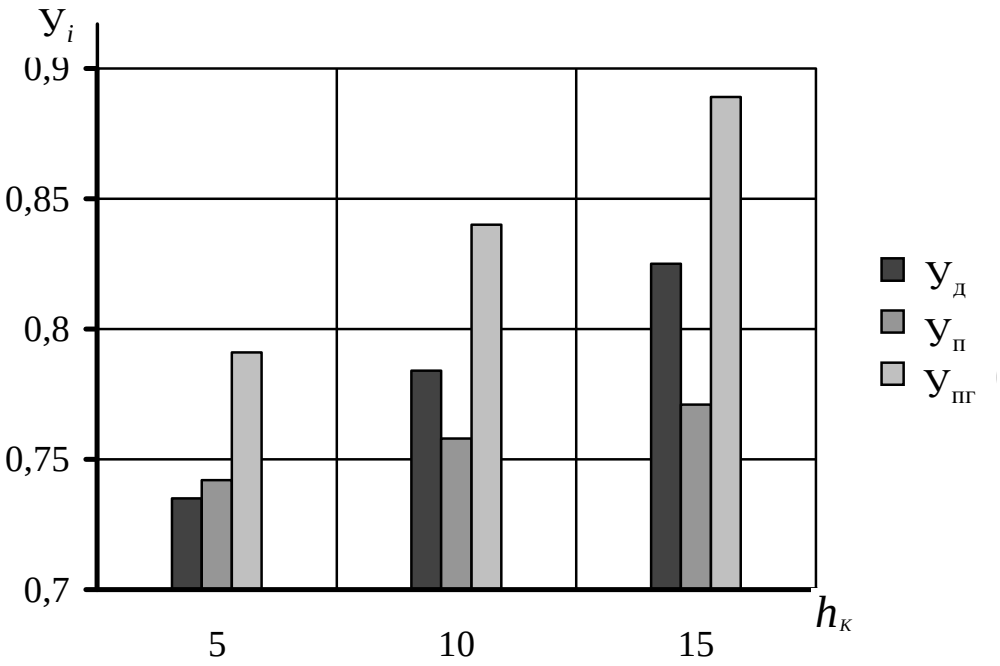


Рис. 161. Зависимость уровня контролепригодности РЭС от точности локализации неисправности

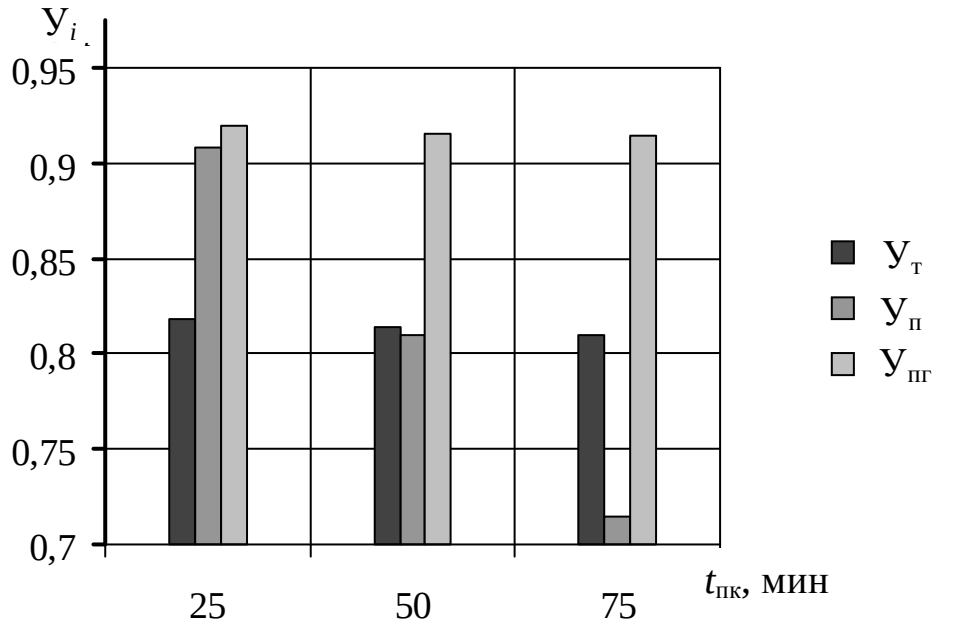


Рис. 162. Зависимость уровня контролепригодности РЭС от времени подготовки к контролю

Приближенная оценка уровня контролепригодности производилась по следующим коэффициентам контролепригодности: $K_{гп}$, $K_{лн}$, $K_{ос}$, $K_{ид}$.

Анализ этих зависимостей показывает, что изменение h_K, F, t_C, $t_{пк}$ от минимального до максимального значения приводит к изменению в третьем знаке значения общего уровня контролепригодности.

7.3. Оптические методы контроля в производстве печатных плат

Печатная плата, появившаяся около 50 лет тому назад, продолжает оставаться одним из важнейших элементов электронных узлов. За 5 лет рынок их сбыта расширился не менее чем в 2 раза, причем темпы роста производства в США и Японии выше, чем в странах Западной Европы.

Общая тенденция миниатюризации электронных компонентов приводит к уменьшению толщины и ширины полосковых проводников, расстояния между ними, толщины диэлектрических подложек ПП. Это обстоятельство требует изменения не только технологии производства ПП, но и технологии и организации их контроля.

Существует два основных метода контроля ПП: электрический и оптический. Первый применим не на всех стадиях производства ПП и характеризует лишь текущее состояние электрических соединений, не прогнозируя их поведение в будущем. Оптические методы принципиально позволяют обнаруживать дефекты любого типа, обеспечивают более высокую скорость получения и переработки информации, весьма универсальны. Оптические методы относятся к бесконтактным, так как контролируется не сама ПП, а ее изображение в контрольном устройстве. Контроль фоточувствительного покрытия ПП сводится в большинстве случаев к проверке равномерности его нанесения и наличия микродефектов – проколов. На стадии фиксации рисунка и окончательной доводки контролируются ширина полосковых проводников и расстояние между ними, наличие разрывов и замыканий проводников, отслоение проводников от подложки.

В задачу контроля входит не только отбраковка ПП на всех стадиях технологического процесса, но и выявление определенных статистических закономерностей для принятия оперативных по воздействию на технологический процесс. Если исключить контроль отслоения проводников, все остальные контрольные операции связаны с измерением линейных размеров: диаметра проколов,

ширины проводников, расстояний между проводниками. Поэтому рассмотрим кратко метрологические характеристики ПП и проанализируем линейное разрешение при оптических методах контроля.

Минимальные линейные размеры ПП непрерывно уменьшаются. В настоящее время типовые размеры составляют единицы-десятки микрон, намечается переход в субмикронную область. Поэтому целесообразно оценить возможности оптических методов и границ их применения в части контроля ПП.

Измерение ширины проводников, расстояния между ними, ширины разрыва или перемычки сводится к оценке взаимного положения двух границ в оптическом изображении проводников в контрольном устройстве. Для фотошаблона это границы раздела между прозрачными и непрозрачными участками, т.е. областями с существенно различной оптической плотностью, для ПП между участками с различными значениями коэффициентов оптического поглощения и отражения или в изображении между областями с различной освещенностью. Степень различия оптических характеристик можно описать коэффициентом контрастности. Разумеется, значение этого коэффициента весьма велико для фотошаблонов – там условия близки к идеальным. Для ПП контрастность во много раз ниже, что резко ухудшает надежность контроля изображения.

Степень соответствия изображения ПП исходному объекту в основном зависит от двух параметров оптической части контрольного устройства: разрешающей способности и резкости, т.е. различимости близко расположенных элементов и четкости границ в изображении. Разрешающую способность оценивают, задавая контрастность и минимальное расстояние между соседними элементами, при котором они обнаруживаются как раздельные. Резкость обычно характеризуют среднеквадратической крутизной перепада яркости изображения.

Крутизна перепада яркости изображения возрастает при увеличении степени когерентности излучения, причем одновременно граница в изображении смещается вправо относительно своего геометрического положения.

При контроле фотошаблонов ошибка, связанная с выбором порога отсчета освещенности, при постоянной ширине полосковых проводников может быть скомпенсирована. При измерениях на ПП дело осложняется изменением характеристик поглощения и отражения материалов проводников и подложки в значительных

пределах. При изменении коэффициента отражения ПП изменяется и перепад освещенности изображения, что при постоянстве порогового уровня определения границы может привести к появлению погрешности измерений, особенно при микронной ширине проводников.

Таким образом, при контроле ПП оптическими методами необходимы учет инструментальных погрешностей, оценка степени влияния объекта измерений на точность, специальные методы калибровки измерительных блоков контрольных установок.

Оптический контроль рисунка проводников на ПП является частным случаем общей задачи распознавания образов. Существенное упрощение при этом заключается в том, что требуется оценка близости данного изображения не с одним из множества эталонов, а с единственным эталоном. Однако задача осложняется необходимостью проведения количественных оценок множества параметров: размеров проводников, отверстий, контактных площадок и относительного расположения перечисленных элементов. Именно последнее обычно не позволяет контролировать изображение в целом как некий обобщенный образ, хотя принципиально применение таких методов допустимо, особенно при контроле фотошаблонов со сравнительно большими (десятки и сотни микрон) проводниками и расстояниями между ними.

Общим для всех оптических методов является наличие источника излучения, освещающего контролируемый объект, и приемника, преобразующего оптический сигнал в электрический. Однако источники излучения могут быть когерентными и некогерентными, освещать контролируемый объект целиком или частично, иногда отдельные его точки. Приемник излучения также может быть одно- и многоэлементным, а последний – линейным и плоскостным, матричным.

Методы контроля различаются способом сравнения контролируемого объекта с эталоном, а также формой представления эталона.

В простейшем случае эталоном служит сам физический объект с идеальными параметрами, в других случаях им является бинарный эквивалент упомянутого объекта, а иногда совокупность топологических признаков, характеризующих контролируемый объект. Возможно представление эталона в преобразованном виде, например, в форме пространственного спектра эталонного изображения.

В основу классификации методов контроля ПП можно положить следующие признаки: форма представления эталона, методика сравнения контролируемой платы с эталоном, характер используемого излучения, степень автоматизации, место устройства в технологическом процессе. Две основные формы представления эталона – это дискретная и аналоговая. Поскольку ПП состоит из двух видов материалов: подложки и проводника, к распознаванию которых и сводится процесс контроля, бинарная форма представления эталона выглядит рациональнее и используется гораздо чаще. Аналоговое представление эталона используется в корреляционных методах, а также в дифференциальных, причем в последнем случае возможен и безэталонный контроль. В контурных методах применяется иногда аналоговая форма, чаще – дискретная.

Наиболее высокую производительность обеспечивают корреляционные методы, в частности, те из них, которые основаны на сравнении фурье-преобразования изображения контролируемой платы, исключении из него спектра пространственных частот, соответствующих эталону, и последующем преобразовании разностного спектра для получения изображения только искаженных областей. Практическая реализация этого метода даже для контроля шаблонов встречает значительные трудности вследствие необходимой высокой точности и критичности совмещения фурье-спектров. При контроле ПП значительные флуктуации коэффициентов поглощения и отражения от поверхности подложки и проводников приводят к появлению оптических шумов в их изображении, что создает непреодолимые трудности для практического применения такого метода.

По мнению ряда авторов, контроль ПП может быть сведен к анализу топологических признаков. Действительно, весь набор топологических признаков для данного типа ПП обычно насчитывает не более 30–40 модификаций, т.е. можно контролировать отсутствие разрывов, разветвления и углы, под которыми разветвляются проводники, сужения и переходы к контактным площадкам, отверстия и пр. Варианты топологического анализа могут быть различными: построение ориентированных графов, отслеживание контуров, использование шестиугольников Голея. Анализ топологических признаков обычно осуществляется выделением части ПП в виде «электронного окна», построением для него двоичного эквивалента в виде некоторой матрицы, сравнением последней с допустимыми вариантами. Ограничения этого метода определяются не-

достаточной координатной привязкой обнаруживаемых дефектов, трудностью контроля линейных размеров.

Во многих случаях, в частности при анализе топологических признаков, изображение разбивается на значительное число участков, которые контролируются последовательно. По аналогии с ручными методами визуального контроля здесь говорят о поле зрения контролирующего устройства, т.е. о площади участка ПП, контролируемой в некоторый отрезок времени.

Требования к точности методов контроля в значительной степени определяются минимальными линейными размерами, подлежащими оценке или измерению. В устройствах с дискретизацией координат вместо разрешения используют число дискретных позиций по каждой координате. Точностные характеристики определяют как методику контроля ПП, так и способы технической реализации методов: дискретизация изображения целиком или по частям, степень параллельности обработки информации.

Все изложенное позволяет утверждать, что основной задачей контроля ПП является получение изображения рисунка проводников с необходимой контрастностью. Эта задача осложняется наличием оптического шума в изображении, обусловленного рядом причин. К ним относятся: несовершенство исходных материалов ПП, влияние пыли и механических повреждений поверхности, нарушения технологических режимов, коррозия, дефекты шаблонов. Необходимость выделения сигнала на фоне значительных помех приводит к включению в контрольные установки ЭВМ микропроцессорных устройств с соответствующим математическим обеспечением, что в свою очередь требует предварительного преобразования изображения в некоторый цифровой эквивалент, т.е. дискретизации с заданным шагом по площади изображения и квантования по уровням освещенности в полученных дискретных позициях.

Повышению контрастности способствует выбор в устройстве контроля осветителя с соответствующими параметрами. Однако более существенным оказывается выбор материала подложки, обеспечивающего наилучшую различимость проводников при заданном источнике лучистой энергии. Несмотря на значительное число работ, посвященных выбору диэлектрика для ПП, данные по спектральным характеристикам поглощения и отражения соответствующих материалов отсутствуют.

7.4. Наладка радиоэлектронных средств

Любое электронное устройство после электромонтажа подлежит наладке с целью обеспечения функционирования и достижения номинальных параметров, указанных в технических условиях (ТУ) на изделие. Наладка – это комплекс технологических операций, в результате выполнения которых наладчик, не изменяя схему и конструкцию устройства, достигает путем соответствующих приемов его номинальных характеристик.

Наладка представляет собой сложный ТП, для проведения которого требуется высококвалифицированная рабочая сила. Трудоемкость наладочных работ достигает 40 % от общей трудоемкости изготовления электронных устройств. Особенно сложна наладка макетов и опытных образцов, когда нет проверенного ТП наладки, электромонтажных карт и специализированных стендов. Более того, в этом случае неизвестно, может налаживаемое устройство в заданном схемном и конструктивном исполнении надежно функционировать в соответствии с техническим заданием (ТЗ) или не может, в результате какой-либо принципиальной или схемной ошибки, неудачной конструкции или неудачного монтажа. Трудность наладки состоит также в том, что в электронных приборах, особенно в аналоговых, приходится обеспечивать номинальное значение и высокую стабильность таких физических величин, как электрическое напряжение, ток, сопротивление, электрическая прочность, магнитная и электрическая проницаемости и т.п. Даже правильно спроектированное устройство после электромонтажа может не функционировать из-за следующего:

- изменения параметров элементов в процессе монтажа (перегрев, нарушение изоляции, появление паразитных термопар в местах пайки, отрицательное воздействие флюса и т.п.);
- наличия паразитных взаимных влияний элементов и узлов устройства из-за неправильного их расположения – ошибок монтажа (отклонений от принципиальной электрической схемы);
- ошибок в маркировках элементов;
- скрытых дефектов пайки и многих других причин.

Задачи и методы наладки зависят от типа производства сложности устройства, его назначения, этапов разработки (эскизный, технический или рабочий проекты), условий эксплуатации и т.п.

Наладка опытных образцов осуществляется, как правило, при непосредственном участии разработчика схемы. При этом используется большой набор контрольно-измерительного оборудования (КИО).

Наладка устройств в серийном производстве сводится к устранению ошибок монтажа, проверке режимов элементов и регулировке изделия с целью достижения заданных характеристик.

Исходные данные

Виды и количество необходимой исходной документации зависят от производства, сложности изделия и степени его членения на сборочные единицы.

В общем случае в качестве исходных данных используется следующая техническая документация: техническое описание, технические условия на изготовление, принципиальные электрические и электромонтажные схемы, схема внешних соединений, а также программа испытания изделия.

На основании перечисленной документации разрабатываются технологические карты и инструкции по регулировке, которые составляются с более жесткими допусками по сравнению с требованиями ТУ. Это объяснится тем, что такие допуски на отдельные операции обеспечат соответствие изделия в целом ТУ при его общей регулировке и контроле. Кроме того, технологический запас допусков должен обеспечить нормальную работу изделия в реальных условиях при воздействии климатических факторов.

В технологических картах приводится описание работ и операций, выполняемых над изделием; при этом указываются способы выполнения работ, даются схемы подключения измерительных приборов, перечень необходимых приборов, инструментов, специального оборудования, пределы показаний приборов, описываются мероприятия, проводимые регулировщиком при непредвиденных остановках или задержках в работе.

В картах приводится временной график выполнения работ и указывается время, необходимое на выполнение каждой операции.

Технологические карты применяют в серийном и массовом производствах при регулировке сравнительно простых устройств.

В технологических инструкциях указываются:

- требования к состоянию изделия, при котором производится его регулировка, и квалификация наладчика;

- перечень КИО, инструментов и приспособлений;
- меры безопасности;
- требования к рабочему месту; порядок подготовки к регулировке и подключению приборов;
- последовательность проведения регулировочных операций поблочно и изделия в целом, способы регулирования отдельных составных частей;
- количество рабочих режимов регулирования и их зависимость от климатических условий, а также ориентировочная продолжительность этих режимов в часах. В необходимых случаях в технологическую инструкцию включают временные диаграммы работы устройства согласно принципиальной или функциональной схемам.

Технологические инструкции применяются как в опытном, так и серийном производстве. Они по сравнению с технологическими картами дают большую информацию для регулировщика и способствуют повышению качества и производительности регулировочно-настроечных работ.

Для проверки правильности электромонтажа, соответствия параметров схемы заданным и проверки цепей электропитания пользуются электроконтрольными картами (ЭКК) сопротивлений и напряжений, которые составляются по результатам измерений величин сопротивлений и напряжений у проверяемого, соответствующего ТУ изделия, принятого за эталон. В ЭКК указываются значения сопротивлений и напряжений в наиболее важных контрольных точках устройства относительно корпуса или между какими-то точками.

В массовом и крупносерийном производствах, когда ТП регулировки расчленяется на отдельные операции, технологические карты и инструкции, а также ЭКК сопротивлений и напряжений должны при необходимости составляться для каждой операции отдельно. Кроме того, стандартами ЕСТД дополнительно устанавливается следующая технологическая документация:

1) операционные карты технологического контроля (ГОСТ 3.1502–74), в которых указывают содержание операции по переходам, применяемые приспособления, измерительные инструменты, приборы;

2) ведомости операций технологического контроля (ГОСТ 3.1502–74), в которых содержатся перечень и описание всех операций технического контроля, выполняемых в одном цехе, в технологической последовательности с указанием данных об оборудовании и оснастке;

3) карты измерений (ГОСТ 3.1504–74), которые служат для регистрации измерений контролируемых параметров.

Уровни и способы поиска неисправностей персональных ЭВМ

Рассмотрим три уровня поиска неисправностей и ремонта ПЭВМ: платы, ИС и схемы. Каждый уровень имеет свои цели при поиске дефектного компонента или соединения с последующей заменой или ремонтом.

На уровне плат заменяют подозрительную ПП; на уровне ИС определяют и заменяют дефектную ИС или компонент; на уровне схемы определяют точную причину неисправности.

Проще всего заменить всю дефектную плату. При замене ИС используют два способа. Первый способ заключается в замене ИС по одной до тех пор, пока не будет обнаружена дефектная. Труднее всего точно найти дефектную ИС и заменить только ее. К сожалению, в ПЭВМ этот уровень сложнее, чем в РЭА. Прежде всего в ПЭВМ только небольшое число ИС находится в гнездах. Многие ИС впаяны в плату, что усложняет их замену. Второй способ заключается в определении подозреваемых ИС и замене их по одной до обнаружения дефектной ИС.

Замена плат. Когда ПЭВМ выходит из строя, пользователя не интересует, почему это случилось, ему нужна работающая ПЭВМ.

В ПЭВМ типа IBM PC бывает шесть и более плат (основная плата и съемные дочерние платы). В этом случае технику необходимо отыскивать дефектную плату. Он должен проанализировать симптомы неисправности, определить дефектную плату и заменить ее. Операция диагностирования и замены ПП повторяется до успешного завершения ремонта.

Если имеются конкретные симптомы, указывающие на одну или две платы, например, на дисплее изображение мелькает или нарушается строчная (кадровая) синхронизация, неисправными считаются плата монохроматического адаптера или цветная графиче-

ская плата. Их нужно заменять по одной, и изображение восстановится. Если этого не происходит, значит неисправность находится в мониторе.

Еще один симптом, относящийся к данным платам, связан с отсутствием графических изображений на экране монитора. Этот симптом также требует замены плат. Если неисправность исчезает, то неисправна одна из ИС на дефектной плате. Когда на экране отсутствует текст, а графика выводится, неисправность находится в цветной или графической плате, так как именно она задает графический или текстовой режим. При замене платы неисправность обычно исчезает.

Симптом, относящийся к цветной (графической) плате, заключается в отсутствии цвета или плохом цвете. Именно эта плата формирует цвета. Если новая плата не восстанавливает цвета, то неисправен цветной монитор.

Схемы клавиатуры, естественно, вызывают неисправности, относящиеся к клавиатуре. Например, при нажатии клавиши на экране появляются неправильные символы. Возможно, вместо прописных букв появляются строчные, или наоборот. Клавиатура в IBM PC сама по себе является небольшим компьютером со своим процессором и ПЗУ. Для устранения таких неисправностей необходимо заменить плату клавиатуры. Неисправности на этих платах вызывают невозможность обращения к накопителям или ошибки в операциях считывания и записи.

Тщательный анализ симптомов позволяет определить возможную причину неисправности одной или двух плат. Если, например, один накопитель не проводит считывание и запись, то неисправна аналоговая плата накопителя. Когда не считывают и не записывают оба накопителя, дефект находится на плате адаптера дисковых накопителей. Если к накопителям вообще невозможно обратиться, подозрительны обе платы. Кроме конкретных неисправностей, есть такие общие симптомы, как отсутствие изображения или «мусор» на экране. К сожалению, эти симптомы вызываются многими платами, исключая платы дисковых накопителей. В этом случае приходится проверять клавиатуру, основную плату и две дисплейные платы.

Несмотря на дороговизну замены плат, для сокращения времени ремонта во многих случаях пользуются этим способом.

Обслуживание на уровне микросхем. Если представить ПП небольшим электронным городом, то ИС следует считать домами. Обычно неисправность возникает только в одной ИС или поддерживающих компонентах. Наиболее сложным при ремонте оказывается поиск дефектной ИС или компонента.

При тщательном изучении симптома (признака) неисправности определяется подозрительная ИС. Каждая ИС выполняет конкретные функции.

Эти функции могут быть простыми или сложными, но все они важны для работы ПЭВМ. Печатная плата с десятками ИС чрезвычайно сложна, но только из-за большого числа схем. Разобраться в каждой ИС не составляет труда. К счастью, нет необходимости разбираться с работой каждого транзистора и даже отдельных узлов, составленных из них, таких как триггер, регистр или дешифратор. Даже если определено, что не работает какой-либо разряд регистра, заключенного в БИС, то все равно необходимо заменить целиком всю БИС. Поэтому необходимо знать, какие сигналы должны поступать на входы ИС, что с ними происходит в ИС и какие сигналы в результате работы должны появиться на выходе. Этой информации достаточно для того, чтобы можно было отремонтировать ПЭВМ.

Все ИС на ПП расположены в определенном порядке. Для обслуживания на уровне ИС необходима диаграмма, показывающая неисправность, которая возникает при выходе той или иной ИС из строя. При неисправности появляется симптом, и диаграмма показывает, какая ИС соответствует данному симптому. Когда из диаграммы известны подозрительные ИС, необходимо найти дефектную ИС.

Схема размещения ИС должна показывать физическое местонахождение ИС на плате, общий номер каждой ИС, ключ для нумерации контактов и все важные контрольные точки на плате. Такими точками служат указания портов, предохранителей, сетевого переключателя и других элементов. Сама схема может быть оформлена как рисунок, фотография, топология платы и даже сама плата. В простейшем случае схема представляет собой чертеж размещения ИС.

Работа со схемой размещения. Типичный поиск неисправности ПЭВМ происходит следующим образом. При включении большинство ПЭВМ выполняют диагностические тесты микросхем. Тесты проводятся при инициализации процессором различных регистров ИС. Процессор по указанию операционной системы заставляет дефектную ИС выполнять несложные действия. Если ИС не

проходит тест, устанавливается флажок и на экране появляется сообщение о неисправности.

Предположим, что после включения ПЭВМ на экране появилось сообщение «Микросхема ЗУПВ номер 4 банка 2 системной памяти неисправна» или соответствующий код, по которому можно узнать о неисправности. После этого снимается кожух ПЭВМ и находится основная плата. На схеме размещения расположены ИС четырех банков 0–3 ЗУПВ по девять ИС в банке. По схеме в банке 2 находят ИС 4 в гнезде и определяют ее общий номер 4164. Извлекают дефектную ИС из гнезда и устанавливают на ее место новую согласно указаниям инструкции.

Для более полного понимания сути неисправности дополнительную информацию можно получить из блок-схемы компьютера. Она позволяет перейти от чисто механического ремонта к логическому анализу неисправности и выявить истинную причину отказа.

Большинство ИС для ПЭВМ выпускают в корпусе DIP с двусторонним расположением контактов, БИС и СБИС чаще располагают в корпусах типа PGA, PQFP или PLCC. Для проведения полного тестирования на контактах ИС требуется принципиальная схема. Если потребуется схема внутренней организации ИС, то следует обращаться к справочной литературе по интегральным микросхемам.

Схема размещения, блок-схема и принципиальная схема по разному показывают одни и те же ИС. Схема размещения сообщает физическое расположение микросхем. Ее можно использовать для быстрых проверок, которые позволяют отремонтировать ПЭВМ примерно в 50 % случаев. Блок-схема придает смысл схеме размещения, без блок-схемы схема размещения довольно ограничена по информативности. С помощью блок-схемы и схемы размещения можно осуществить ремонт еще примерно 20 % случаев отказов. Принципиальная схема детализирует блок-схему. Три эти схемы содержат всю необходимую информацию по обслуживанию. С их помощью можно поставить диагноз, найти подозрительную ИС и провести измерения на ее контактах.

Особенности ремонта клавиатуры ПЭВМ

Клавиатура PC, представленная собственно микроЭВМ, при включении питания выполняет самодиагностирование, которое в большинстве случаев составляют два теста:

1) POR (Power-On-Reset) – программа сброса при включении. Клавиатура начинает генерировать POR после того, как питание +5 В наберет 90 %-й уровень. На это время интерфейс клавиатуры запрещен;

2) BAT (Basic Assurance Test) – главный контрольный тест. Генерируется после POR и длится 600–900 мс. В ходе BAT проводятся проверки:

- всех путей доступа к RAM (Random-Access Memory) (для 8048 или другой микроЭВМ);
- контрольных сумм ROM (Read-Only Memory);
- битов констант и адресного теста RAM.

BAT сопровождается проверкой сигнализации LED. BAT запускается также командой RESET – сброс (код FFH). После завершения теста BAT на линии KBDD/ KBDCLK устанавливается высокий потенциал и разблокируется клавиатура для обмена с системой. Если BAT завершен без ошибок, в систему следует команда BAT Completion Code (код AAH) или в противном случае – команда Diagnostic Failure (код FDH или FCH).

При установке клавиатуры необходимо убедиться, что BIOS правильно реагирует на сканкоды, предоставляемые клавиатурой. Клавиши в узлах матрицы размещаются чаще всего по одной из двух систем. Самая распространенная система позиций – QWERTY, менее распространена система Дворака – Дилея. Существуют и другие варианты расположения клавиш, на сканкоды которых BIOS реагирует неадекватно.

Проблемы, связанные с неисправностями клавиатуры, устраняются заменой клавиш шилдового или герконового образца, встречающихся и ныне. Датчики на базе эффекта Холла или емкостные – наиболее надежны. Основная неисправность клавиш – слипание от проникновения извне жидкостей с вязкими включениями. При демонтаже клавишной панели следует соблюдать осторожность, поскольку при съеме рамки с клавишами мелкие детали рамки могут спружинить и быть утеряны.

При ремонте клавиатуры в первую очередь следует проверить сигнальный кабель. Вообще, обрывы в кабелях приводят к плавающим ошибкам. Кроме микроЭВМ в клавиатуре размещены дешифратор типа LSI38 (аналог – ИС К533ИД7), несколько инверторов либо иных логических элементов, проверить которые несложно.

Средства локализации неисправностей, ремонт и отладка системных плат.

Техник, проводящий ремонт электронного оборудования, руководствуется следующими принципами:

1) любые действия, связанные с ремонтом электронного оборудования, предваряются отключением питания;

2) выводы о неисправностях должны делаться после того, как наверняка известно, что все элементы коммутации и разъемы установлены правильно и имеют контакт, а кабели не имеют обрывов;

3) поскольку большинство электронных модулей на системной плате и картах построены на технологиях CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor – комплементарная МОП-технология), критичных к статическому пробою, перед доступом к узлам электроники следует снять с тела статический заряд, коснувшись технологического корпуса. Проводить работы по монтажу следует с установленным на руку браслетом съема статического электричества. Монтажные и наладочные работы лучше не проводить в помещениях с полами, конденсирующими статический заряд. Если это невозможно, помещение следует увлажнить;

4) в силу разрушительного действия переходных процессов в электронике временная задержка между отключением и последующим включением блока питания должна составлять интервал не менее 30–40 с;

5) при ремонте никогда не следует обрывать нагрузку. Это создает повышенную мощность рассеивания на выходном активном элементе либо искажает картину снимаемых параметров. Так, для блока питания используется нагрузка:

- для источника +5 В – 4,7 Ом, 50 Вт;
- для источника +12 В – 12 Ом, 12 Вт.

Иллюзию неработающего источника часто создает чрезмерная нагрузка. Если возможно, следует посекционно отключать потребителей. В этом случае ремонт ЭВМ сводится к последовательному изъятию карт из слотов. Перед этим необходимо отключить блок питания. Замеры питающего напряжения лучше проводить на самих ИС или после переходных разъемов.

Для установки ИС используют панельки (chip sockets), установка и изъятие ИС из которых могут проводиться специальными подъемниками – экстракторами. Основная задача такого приспо-

собления – изъять многоножечную ИС без перекосов и рывков. При этом используют также отвертку с тонким лезвием (twikker).

Техника выпаивания DIP-корпусов заключается в выкусывании ножек с последующим выпаиванием. Локальный перегрев многослойного монтажа паяльником в 30 Вт и выше неминуемо приведет к расслоению и обрывам дорожек, перегревам соседних элементов. Поэтому к выбору паяльных принадлежностей надо относиться серьезно. В большинстве случаев удобен паяльник 18 Вт с теплоотводом либо с газовым нагревателем. При этом необходимо использовать устройство поглощения паров припоя. Нельзя перегревать элементы, но и не допускать «холодных» паек, проявляющих себя по истечении определенного времени. При работе со сквозным монтажом для одновременного прогрева всех ножек ИС и транзисторов применяют специальные насадки на паяльники или специальные паяльные станции. При ремонте рекомендуется пользоваться сигнатурными логическими анализаторами и интерфейсными тестерами. Существуют универсальные и специализированные приборы сервисного оборудования для ремонтных фирм с широким диапазоном функционального применения, позволяющие измерять параметры линий и модулей, скорость обмена и соотношение сигнал-помеха, проверять структуру форматов информационных сообщений. Сигнатурные анализаторы располагают собственной системой команд, контроллером (CPU (Central Processing Unit) – центральный процессор), небольшой памятью. Подключают данные приборы, как и все остальные этой группы, либо через последовательный интерфейс RS-232, либо через параллельный IEEE-488 (GPIB – General Purpose Interface Bas – шина интерфейса общего назначения). Один из вариантов диагностирования ЭВМ – подключение к проверяемой, заведомо исправной ЭВМ, обеспечивающей функции анализатора неисправностей в системе.

Системы автоматической проверки плат, применяемые для определения неисправностей с точностью до точки на плате или в СБИС, представляют собой комплексы. Они также используются в технологии САПР элементной базы с заданными параметрами. Столь широкий диапазон действия комплексов позволяет использовать их фирмами-гигантами INTEL, MOTOROLA.

Наиболее простая категория комплексов предназначена для ремонтных работ, причем квалификация оператора (не электронщика) значения не имеет, поскольку процесс полностью автоматизирован. Комплекс состоит из двух компонентов – контроллера (PC-386) и собственно прибора, состыкованного с контроллером

через интерфейсы RS-232, VXI, ISA, GPIB, EISA. Прибор – это автоматизированный тестер, имеющий управляющую часть (CPU типа FVD2910 с обрамлением и DRAM) и узел измерений, который стыкуется с различными платами с помощью набора стыковочных элементов (драйверов-сенсоров), а также подключается непосредственно к элементам на плате с помощью группы клипсов и активных щупов. Для правильной настройки на конкретную плату электроники используют обширную базу данных, в которой находятся все электрические и конструктивные параметры, топология, система питания и другие сведения, интересующие систему. Операционная система из UNIX-подобных также активно взаимодействует с утилитами ввода-вывода и программами-имитаторами, обеспечивающими проверку плат. Все программные средства являются разработками фирм-изготовителей тестеров, среди которых можно выделить фирму SHLUMBERGER, выпускающей следующие тестеры:

S-635, S-645 – для ремонта плат;

S-730, S-780, S-790, S-900, S-3000, S-3500 – для САПР.

Среди прочих выделяются следующие тестеры:

GR-2225, GR-2235 – фирмы GEN REG;

UL-500 (рабочая частота F – 800 мГц) – фирмы AT&T.

Логический пульсатор – устройство, предназначенное для формирования импульсов различной длительности, которые вводятся в проверяемую схему. Логические щупы (пробники) – устройства, предназначенные для индикации логических уровней TTL и схем CMOS. Кроме индикации единиц и нулей, требуется индикация серий импульсов. Настройка на уровни и частоту следования проводится индивидуально. В качестве генератора импульсов можно рекомендовать один из генераторов стандартных сигналов (ГСС) промышленного образца. Желательно иметь инвертированный и фиксированный уровни TTL.

7.5. Основные понятия поиска неисправностей

Современные РЭС представляют собой сложное устройство, состоящее из совокупности элементов, составляющих определенное множество. Под элементами, принадлежащими множеству, понимаются микросхема, электрорадиоэлемент (ЭРЭ), перемычка, пайка и т.д. – все, от чего зависят исправность и работоспособность РЭС.

РЭС можно представить в виде «черного ящика», на входы которого поступают информация и напряжение питания, а на выходе появляется информация в виде электрического сигнала, звука, изображения и т.д.

Неисправность РЭС проявляется в виде искажения выходной информации или ее отсутствия (при наличии входного сигнала и напряжения питания). Источником неисправности могут быть один или несколько элементов, а также внешние воздействия и факторы, не входящие в множество элементов РЭС: пыль, влага, застывшие капли припоя и т.д. Неисправные элементы РЭС называются дефектными элементами. Каждый элемент (деталь) РЭС оказывает влияние на формирование выходных параметров. Зависимость между состояниями элементов РЭС и ее выходными параметрами носит неоднозначный характер: большинство элементов влияет сразу на несколько параметров, а сами параметры могут зависеть от многих элементов. Например, конденсатор сглаживающего фильтра служит для уменьшения пульсаций в блоке питания монитора. При появлении волнообразных искажений краев растра можно сделать вывод, что пульсация напряжения питания возросла из-за уменьшения емкости конденсатора фильтра. Но к такому же внешнему проявлению приводят и другие дефекты, увеличивающие пульсацию (выход из строя стабилитрона в стабилизаторе напряжения, возрастание тока нагрузки и пр.).

Недостаток подобного подхода заключается в том, что он учитывает ухудшение элементов лишь в количественном отношении (уменьшение емкости), не принимая во внимание качественные изменения (появление проводимости у конденсаторов). Количественные изменения характеристик элементов могут приводить к различным внешним проявлениям. Влияние дефектного элемента одновременно на несколько выходных параметров РЭС в ряде случаев облегчает нахождение неисправности.

Работу РЭС можно оценивать различными показателями:

- физическим состоянием элементов (оценивается внешним осмотром);
- качеством выдаваемой информации;
- формой и значением напряжений в различных точках (оцениваются по показаниям измерительных приборов).

Начинать поиск неисправностей необходимо с обнаружения существенных противоречий в этих показателях. На определении

этих противоречий основаны все методы поиска неисправностей. Следует иметь в виду, что ремонт РЭС состоит не только в определении и устранении неисправности, но и в выполнении этой задачи в кратчайший срок минимальными средствами: рабочего времени, комплектующих деталей, вспомогательных материалов и т.п.

Неоправданным можно считать ремонт РЭС в следующих случаях:

- РЭС морально устарела, дли нее уже не выпускают запасные детали, а установка нетиповых деталей требует значительных затрат времени, доработки конструкции и пр.;
- РЭС физически устарела, в ней заметно проявляются процессы старения материалов, снижение диэлектрических показателей изолирующих материалов: старение паек, высыхание оксидных конденсаторов и пр.;
- РЭС имела механические повреждения в результате удара, падения или подвергалась химическим воздействиям (попадание морской воды внутрь корпуса и др.).

При замене той или иной детали нередко одновременно проводят замену прилегающих к ней соединительных элементов и обновляют пайки. Например, при замене ИС одновременно обновляются и пайки ее выводов. При этом возможны следующие варианты:

- дефектной была ИС, и после ее замены неисправность устранена;
- ИС была исправна, а дефектными были пайки ее выводов, и в процессе замены ИС дефект устранен;
- при замене ИС из-за небрежной пайки на ПП образовалась перемычка из припоя между выводами ИС, что привело к дополнительной неисправности.

7.5.1. Классификация дефектов радиоэлектронных средств

От характера дефектов во многом зависят особенности их поиска. В первую очередь необходимо выяснить, имеется ли вообще неисправность (неправильная установка устройств регулировки, переключателей и т.п.). Поэтому важно определить, к какому типу относится данный дефект. Классификация дефектов по признакам

может ускорить определение неисправности и соответственно сократить время, затрачиваемое на ремонт.

Все дефекты, встречающиеся в РЭС, можно классифицировать по признакам: трудоемкости обнаружения; сложности; количеству; степени связанности; скорости проявления; особенности проявления; месту нахождения дефекта в одной из подсистем РЭС; внешнему проявлению; источнику неисправности; причинам возникновения; значимости. Это разделение условное, так как сами признаки не могут иметь четких границ. Например, одна и та же неисправность может иметь сразу несколько признаков.

По трудоемкости обнаружения различают дефекты: очевидные, на поиск которых затрачивается мало времени; типовые, имеющие однозначную связь с их внешним проявлением; нетиповые, на поиск которых затрачивается больше времени.

По сложности обнаружения различают дефекты: простые, когда дефект очевиден и легко устраним; несложные, когда дефект легко отыскивается, однако устранение его затруднено (замена вышедшей из строя печатной платы); сложные, когда дефект непросто отыскать, но легко устранить (плохая пайка, в которой контакт нарушается лишь с прогревом изделия); микроперемычки на печатной плате из-за действия агрессивной среды; очень сложные, когда дефект трудно отыскать и устранить (случайные межэлектродные замыкания).

По количеству различают дефекты одиночные и групповые, когда несколько неисправностей проявляются одновременно.

По степени связанности дефекты разделяют на независимые и коррелированные, причем корреляция может быть вызвана причинами неисправности как самого изделия, так и условиями эксплуатации.

По скорости проявления дефекты бывают внезапные и постепенные.

По особенностям проявления различают дефекты: постоянно проявляющиеся; непостоянные, проявляющиеся время от времени без явных причин; проявляющиеся или пропадающие в процессе прогрева (в первом случае дефект отыскивается методом электропрогона, а во втором – РЭС дают остыть и обнаруживают дефект сразу после включения); проявляющиеся или пропадающие при механических воздействиях (при простукивании, прижатии стенок или крышки, вращении органов управления и т.п.); самоустраняющиеся.

По местонахождению дефекты разделяются на дефекты подсистемы обработки входной информации, дефекты подсистемы формирования выходной информации, дефекты системы питания.

По внешнему проявлению различают дефекты, связанные с отсутствием какого-либо параметра РЭС; с несоответствием какого-либо параметра норме; с появлением на выходе нежелательных сигналов.

По источнику неисправность может быть вызвана выходом из строя одной или нескольких деталей: резисторов, предохранителей, разъемных соединителей, переключателей, конденсаторов, моточных изделий, диодов, транзисторов, микросхем, кинескопа, а также печатного и объемного монтажа.

По причинам возникновения дефекты бывают случайные или детерминированные, т.е. вполне определенные, которые можно предусмотреть. К детерминированным дефектам относятся:

- недостатки конструкции, заложенные при ее разработке: малонадежные элементы (например, конденсаторы типа К10-7В);
- элементы, эксплуатирующиеся в режимах, близких к предельно допустимым (статистика ремонтов показывает, что в первую очередь в РЭС выходят из строя транзисторы, работающие при напряжениях, приближающихся к предельным);
- конструктивные решения, не обеспечивающие надежность контактных соединений или, наоборот, вызывающие нежелательные связи (блочно-модульный принцип построения современной РЭС при всех его достоинствах существенно увеличивает число разъемных соединений, а недостаточная надежность механических контактов повышает вероятность их отказов);
- нарушение технологической дисциплины при изготовлении РЭС (непропаи, качество монтажа и т.п.);
- нарушение условий эксплуатации: эксплуатация РЭС под действием прямых солнечных лучей, вблизи отопительных приборов или с закрытыми вентиляционными отверстиями; использование не предназначенных для данной РЭС предохранителей;
- неосторожное обращение с РЭС, повлекшее к падению, ударам; попадание внутрь РЭС влаги, пыли, насекомых, посторонних предметов (при эксплуатации в условиях повышенной влажности чаще всего выходят из строя элементы, работающие в высоковольтных цепях);

• воздействие статического электричества, которое образуется на коврах, одежде из синтетических материалов и пр.;

• намагничивание маски и бандажа кинескопа близко работающими электробытовыми приборами; неправильное подключение РЭС к источнику питания;

• механические повреждения по вине обслуживающего персонала (особое внимание следует уделять установочным переменным резисторам, которые могут быть неправильно установлены или повреждены из-за применения неподходящей отвертки, а также из-за излишнего усилия при регулировке, могут быть повреждены печатные проводники в местах установки переменных резисторов, переключателей и т.п.);

• неквалифицированное вмешательство в конструкцию РЭС: перепутаны цоколевки установленных элементов, впаяны транзисторы другого типа, установлены дефектные элементы;

• произведены плохие пайки, замкнуты или оборваны проводники;

• плохо установлены или перепутаны соединители;

• изъяты лишние крепежные детали, экраны, проводники соединения с шасси;

• несанкционированное изменение электрической и монтажной схем.

Неквалифицированное вмешательство можно обнаружить при осмотре монтажа. Его признаками являются: нетиповые элементы, плохая пайка, нарушение стопорящей краски на подстроенных и регулировочных элементах, нарушение заводских пломб, нарушение герметизации и т.п.

Любой дефект, проявляющийся в РЭС, нарушает ее нормальную работу. Однако дефекты неравноценны, поэтому целесообразно установить последовательность их поиска и устранения исходя из значимости.

7.6. Математические модели – основа решения задач диагностирования

Известно, что готовность сложных систем ухудшается не только с ростом интенсивности отказов, но и с увеличением продолжительности восстановлений технических устройств, в связи с

этим особую актуальность приобретает задача повышения готовности сложных систем в результате улучшения характеристик восстанавливаемости: времени поиска отказавшего элемента и времени устранения отказа. Опыт эксплуатации показывает, что наиболее продолжительным этапом процесса восстановления работоспособности ТУ является процесс поиска отказавшего элемента. Поэтому в последние годы вопросам поиска отказавших элементов (технической диагностике) уделяется большое значение.

Диагностика есть отрасль знаний, включающая в себя теорию и методы организации процессов диагноза, также принципы построения средств диагноза. Когда объектами диагноза являются объекты технической природы, говорят о технической диагностике.

Исправное и все неисправные состояния объекта образуют множество его технических состояний. Задачи проверки: 1) исправности; 2) работоспособности; 3) правильности функционирования и поиска неисправностей – представляют собой частные случаи общей задачи диагноза технического состояния объекта.

Основная цель технической диагностики состоит в организации эффективных процессов определения технического состояния различных, особенно сложных, многокомпонентных объектов. Диагноз осуществляется аппаратурными или программными, встроенными или внешними техническими средствами, реализующими тот или иной алгоритм диагноза.

При исследовании, разработке и реализации процессов диагноза технического состояния объектов необходимо решать те же задачи, которые возникают при исследовании, разработке и реализации процессов управления вообще. Это, в первую очередь, задачи изучения физических свойств объектов и неисправностей последних, задачи построения математических моделей объектов и моделей неисправностей. Затем следуют задачи анализа моделей объектов с целью получения данных, необходимых для построения алгоритмов диагноза. Следующую группу образуют задачи, связанные с разработкой принципов построения, экспериментальным опробованием и промышленным внедрением технических средств диагноза. Наконец, следует указать на задачи проектирования систем диагноза в целом и исследования их характеристик и свойств.

Математические модели строят на основе законов и закономерностей, выявленных фундаментальными науками. В конечном

счете ту или иную математическую модель выбирают на основе критерия практики, понимаемого в широком смысле. С усложнением анализируемых объектов использование для этой цели аналитических методов возможно лишь в мало интересных для практики случаях. Выход состоит в переходе к машинным реализациям математических моделей (машинным моделям). При этом на машину возлагается как работа по воспроизведению динамики изучаемой модели (имитация ее траектории), так и по проведению экспериментов с ней.

Математические модели делят на аналоговые и цифровые в соответствии с типами вычислительных машин, на которых они реализовываются.

Аналоговое моделирование основано на возможности описывать разнородные явления и процессы одними и теми же уравнениями. Эти уравнения воспроизводятся обычно с помощью специально подобранных электрических схем. Искомые характеристики получаются путем изменения на модели соответствующих электрических величин. Переработка информации в такой модели носит параллельный характер и реализуется в форме электрического процесса, происходящего в электрической схеме.

Примером алгоритмической модели является конечный автомат, заданный с помощью одношаговой функции перехода, которая собственно и определяет алгоритм пересчета состояний автомата, т.е. воспроизведения его траектории. Примером неалгоритмической модели является система обыкновенных дифференциальных уравнений, в которой для получения решения (траектории) необходимо использовать какой-либо метод интегрирования. Данная модель преобразуется в алгоритмическую при использовании численного метода интегрирования. Такое преобразование приводит, вообще говоря, к изменению свойств модели, что в принципе должно учитываться при использовании.

В процессе моделирования исследователь имеет дело с тремя объектами:

- системой (реальной, проектируемой или воображаемой);
- математической моделью системы;
- машинной (алгоритмической) моделью.

В соответствии с этим возникают задачи построения математической модели, преобразования ее в машинную и программной реализации машинной модели. В процессе решения этих задач

исследователь получает более полное и структуризованное представление об изучаемой системе, разрабатывает различные варианты модели, отвечающие разным сторонам функционирования системы и их структурных преобразований.

7.7. Основы моделирования конструкций и технологических процессов производства радиоэлектронных средств

Моделирование – исследование каких-либо явлений, процессов или систем объектов путем построения и изучения их моделей. Моделирование – одна из основных категорий теории познания. На идее моделирования базируется любой метод научного исследования, как теоретический, так и экспериментальный. Любое явление можно считать понятным, когда, во-первых, найдено его математическое описание, т.е. то, что мы называем математической моделью, а во-вторых, эта математическая модель исследована, т.е. найдено решение уравнений. Модель выражает количественные и качественные закономерности, свойственные рассматриваемым процессам или устройствам. Модель – это идеализация, она никогда не может быть точной копией объекта исследования, но между ними должны быть соблюдены некоторые соотношения подобия, которые гарантировали бы возможность использования сведений, полученных в результате моделирования для оценки свойств реального объекта – оригинала.

В общем случае исходные данные для проектирования конструкции, а значит, и для построения ее модели, включают такие основные компоненты:

- условия функционирования системы или явления, ограничения на структуру и параметры системы, совокупность показателей качества – некоторых параметров системы, определяющих ее качество и варьируемых в процессе проектирования;
- ограничения на показатели качества, определяемые возможностями реализации системы.

Система, которая удовлетворяет всей совокупности условий и ограничений на параметры и структуру, называется допустимой. Допустимая система, которая удовлетворяет ограничениям на показатель качества, называется строго допустимой. Таким образом,

задачей проектирования является создание строго допустимой системы, обладающей наилучшей по заранее выбранному критерию совокупностью значений показателей качества. Такая система может быть названа оптимальной. Чтобы получить такую систему, необходимо найти экстремальные значения показателей качества. Их зависимость от параметров системы носит название целевой функции. В целом совокупность целевых функций и ограничений представляет математическую формулировку задачи проектирования систем или явлений, т.е. является математической моделью объекта исследования. Математическая модель может быть названа универсальным инструментом проектирования и использована в инженерном проектировании.

В проектировании используют следующие виды моделей:

- графические и описательные (схемы, графики, которые иллюстрируют процессы, происходящие в устройствах, описания алгоритмов и т.д.);
- физические – они полностью повторяют объект исследования и могут быть масштабными, повторяющими в определенном масштабе форму объекта;
- математические – это наиболее совершенные модели. Математические модели могут быть динамическими и статическими (стационарными), кроме того, интерполяционными (частными) и экстраполяционными (обобщенными). К интерполяционным обычно относят эмпирические модели, а к экстраполяционным – аналитические модели.

Для исследования математической модели может быть использован весь аппарат современной математики. При решении математических моделей могут применяться как аналитические методы, так и численные. Аналитические методы дают решение в общем виде, что очень существенно при больших вариациях исходных данных. Однако их целесообразно применять лишь в случаях простых зависимостей. Численные методы, основанные на использовании ЭВМ, обеспечивают решение уравнений высших порядков и с большим числом переменных, но выдают решение только при конкретных исходных данных.

Поскольку системный подход ориентирует конструктора и технолога на раскрытие целостности объекта проектирования (т.е. конструкции РЭС или технологического процесса), на выявление многообразных связей физических явлений в нем и сведение их

в единый образ, то встает вопрос о практической фиксации этого образа с целью проведения его исследований. На всех этапах автоматизированного проектирования РЭС такая фиксация проводится в виде набора различных моделей.

Роль моделей в проектировании РЭС. Рассмотрим процесс автоматизированного проектирования РЭС с точки зрения использования в нем различного рода моделей. На рис. 163 показано, что исходные данные на проектирование РЭС содержатся в техническом задании. И от него осуществляется переход непосредственно к проекту РЭС. Вначале, как уже упоминалось выше, проект предстает как мысленный образ будущей схемы и конструкции РЭС, который фиксируется в виде эскизных схем и чертежей. Впоследствии этот образ многократно уточняется по мере разработки схем и чертежей на стадиях технического и рабочего проектирования. При этом несколько раз циклически реализуется замкнутая цепь переходов от одной модели к другой.

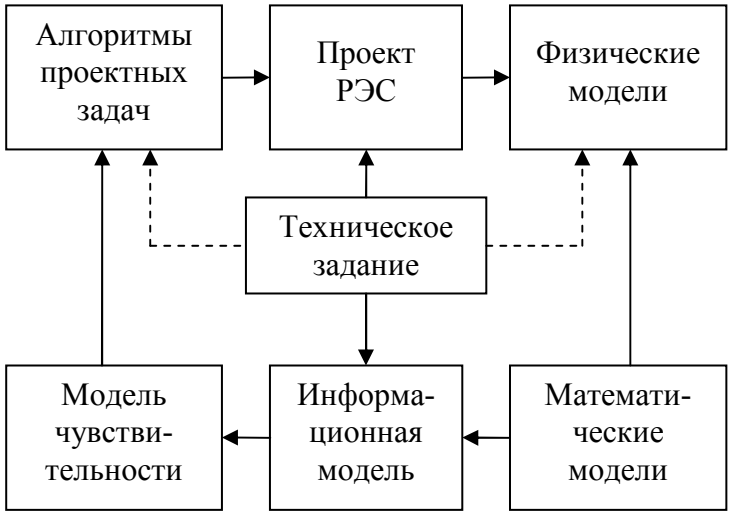


Рис. 163. Роль моделей в автоматизированном процессе разработки РЭС

Переход в очередном цикле от проекта РЭС к физическим моделям процессов, протекающих в схемах и конструкциях, заключается в формализации последних, т.е. структура схемы и конструкции приводится к типовому виду, предусматривающему определенный набор элементов с идеализированными свойствами. Рядом мелких деталей и локальных процессов пренебрегают. Но при этом учитываются требования технического задания на проектирование с точки зрения отражения в физической модели тех особенностей

протекания процессов, по которым оценивается разрабатываемая аппаратура (пунктирная стрелка на рис. 163).

Первый пример: при переходе к физической модели электрического процесса, протекающего в схеме РЭС, каждого его радиоэлемента (резистора, транзистора, микросхемы и пр.) формализуется, т.е. графически изображается (или подразумевается) геометрия, в которую внесена некоторая идеализация. В рамках данной геометрии рассматривается протекание электрического процесса. Паразитные связи, вносимые конструкцией, отражаются в физической модели с помощью условных обозначений идеальных РЭ (резистора, конденсатора, транзистора и пр.). Это дает возможность применять впоследствии для математического описания физических моделей схем канонические формулы и уравнения для элементов или типовые формы графов для них.

При построении физических моделей электрических процессов, протекающих в схемах РЭС, с позиций системного подхода решаются вопросы о необходимости учета тех или иных паразитных явлений влияния конструкции, о видах применяемых моделей РЭС, о характере учета воздействия внешних факторов и пр.

Второй пример: печатная плата с расположенными на ней РЭС (печатный узел) при исследовании на механические воздействия формализуется в виде тонкой ортотропной пластины с сосредоточенными на ней массами РЭС, контуры которых идеализируются прямоугольниками, вписанными в нанесенную на чертеж платы сетку. Идеализируются также свойства материала платы, а именно, принимается гипотеза его однородности вдоль сторон платы, не учитываются расположенные на плате печатные проводники и отверстия, в которые впаяны ножки РЭС, и т.п. Такое представление печатного узла позволяет описать его колебания с помощью бигармонического уравнения, известного из теории упругости для тонких пластин.

В результате формализации получаются физические модели, которые изображаются в условных обозначениях и соответствующих терминах: электрические модели – в терминах электроники и радиотехники; механические модели – механики; тепловые модели – теории тепломассообмена и т.д. В принципе, физические модели РЭС можно изготовить в виде макетов. Однако автоматизация проектирования с помощью ЭВМ сделала макетирование практически ненужным, поскольку математическое моделирование позволяет

более полно и с меньшей трудоемкостью провести системный анализ комплекса физических процессов РЭС.

Переход от физических моделей к математическим (см. рис. 163) осуществляется путем математического описания физических элементов и их соединений с помощью известных законов Ома, Кирхгофа, Фурье, Гука, сохранения энергии, импульса и пр. Поэтому данный переход от заданной физической модели может выполняться автоматически по типовым алгоритмам. Формы математических моделей подробно будут рассмотрены в следующих параграфах настоящей главы.

Математические модели являются основой для расчета выходных характеристик РЭС, а также его промежуточных переменных величин и показателей, по которым оценивается фактическое состояние схемы и конструкции или технологического процесса (если в исследованиях рассматривается его модель). Вместе с предельными значениями, оговоренными в техническом задании на проектирование, эти характеристики, промежуточные переменные и показатели составляют информационную модель РЭС. Она содержит в себе информацию о степени удовлетворения предъявляемых к РЭС требований об электрических, тепловых, механических и прочих перегрузках радио- и конструктивных элементов, о возможных отказах и ухудшении качества.

Информационная модель РЭС дает возможность выработать рекомендации о необходимости дальнейших исследований и внесения изменений в ее проект. При этом определяют, какие выходные характеристики и насколько нужно изменить. Исходя из конструктивного исполнения РЭС и некоторых других соображений выделяется множество внутренних параметров элементов, которые могут быть управляемыми.

Для выяснения, какие же из управляемых параметров целесообразно использовать для изменения выходных характеристик, необходимо рассчитать функции чувствительности рассматриваемых выходных характеристик к каждому управляющему параметру. В простейшем случае коррекция одной выходной характеристики может быть осуществлена за счет изменения одного внутреннего параметра, к которому эта характеристика наиболее чувствительна. Поэтому следующим шагом после анализа информационной модели является построение моделей чувствительности. Расчет необходимых приращений управляемых параметров на основе полученных функций чувствительности производится с помощью алгорит-

ма, входящего на рис. 163 в блок «Алгоритмы проектных задач». Одновременно решаются другие проектные задачи: оптимизации параметров; исследования их разбросов, включая задачи технологической точности, серийнопригодности, эксплуатационной стабильности, надежности и пр. На основании полученных проектных решений вносятся изменения в схему, конструкцию и технологию, т.е. в проектную документацию.

Рассмотрим моделирование процессов на основе аналогии. Разновидностью физических моделей являются аналоговые, в которых реальные физические процессы заменяются другими физическими процессами, но аналогичными по своему действию на рассматриваемый объект исследования. Например, исследования распределения температур в объекте можно более оперативно выполнить, если построить электрическую модель объекта, где источники тепла заменяются источниками тока, а тепловые сопротивления заменяются резисторами, включенными соответствующим образом.

Электротепловую аналогию можно выразить следующими уравнениями:

1. Плотности тока и теплового потока в изотропной среде:

$$j = -\sigma \operatorname{grad} U; \quad P = -\lambda \operatorname{grad} t,$$

где U – потенциал; σ – удельная электропроводность; λ – коэффициент теплопроводности; t – температура.

2. Потоки J и P электрического и теплового полей:

$$j = -\sigma \int_S \operatorname{grad} U d\bar{s}; \; P = -\lambda \int_S \operatorname{grad} t \, dt.$$

3. Объемная плотность тока и производительность внутренних источников тепла:

$$div\, \bar{j} = j_v; \; div\, \bar{p} = q_v.$$

4. Поле потенциалов и температурное поле (уравнение Пуассона):

$$\Delta^2 H = -\frac{j_v}{\sigma}; \; \Delta^2 t = -\frac{q_v}{\sigma},$$

т.е. аналогами являются

$$\bar{j} \leftrightarrow \bar{p}; \; J \leftrightarrow P; \; j_v \leftrightarrow q_v; \; U \leftrightarrow t; \; \sigma \leftrightarrow \lambda.$$

Соотношения между аналогами определяются масштабными коэффициентами подобия:

$$\frac{X}{x} = k_x;\ \ \frac{Y}{y} = k_y;\ \ \frac{Z}{z} = k_z.$$

Здесь X, Y, Z и x, y, z – координаты сходственных точек оригинала и модели соответственно.

В случае геометрического подобия $k_x = k_y = k_z = k_L$. Для решения тепловой задачи необходимо задать граничные условия, характеризующие взаимодействие исследуемой области температурного поля с окружающей средой. Граничные условия вводятся к заданию значений самой искомой функции, ее производной либо их линейной комбинации на границах рассматриваемой области. Сущность метода электрических сеток заключается в разделении моделируемой области на элементарные объемы и замене сплошной проводящей среды элементарных объемов эквивалентными схемами замещения. На основании объединения эквивалентных схем замещения элементарных объемов получаем модель в виде сетки электрических сопротивлений. Переход от сплошной проводящей среды к сетке сопротивлений означает замену непрерывного распределения величин в моделируемой области дискретным распределением, что соответствует конечно-разностной аппроксимации уравнения поля.

При построении сетки сопротивлений в прямоугольной системе координат элементарные объемы представляют собой параллелепипеды со сторонами Δx, Δy, Δz. При этом эквивалентные схемы замещения могут быть двух видов (рис. 164). В первом случае (позиция *а*) узлы размещаются в центре элементарного параллелепипеда, а резисторы эквивалентной схемы замещения включаются между узлом и центрами граней. Во втором случае (позиции *б*, *г*) узлы размещаются в вершинах элементарного параллелепипеда, а резисторы эквивалентной схемы замещения включаются между узлами вдоль ребер параллелепипеда.

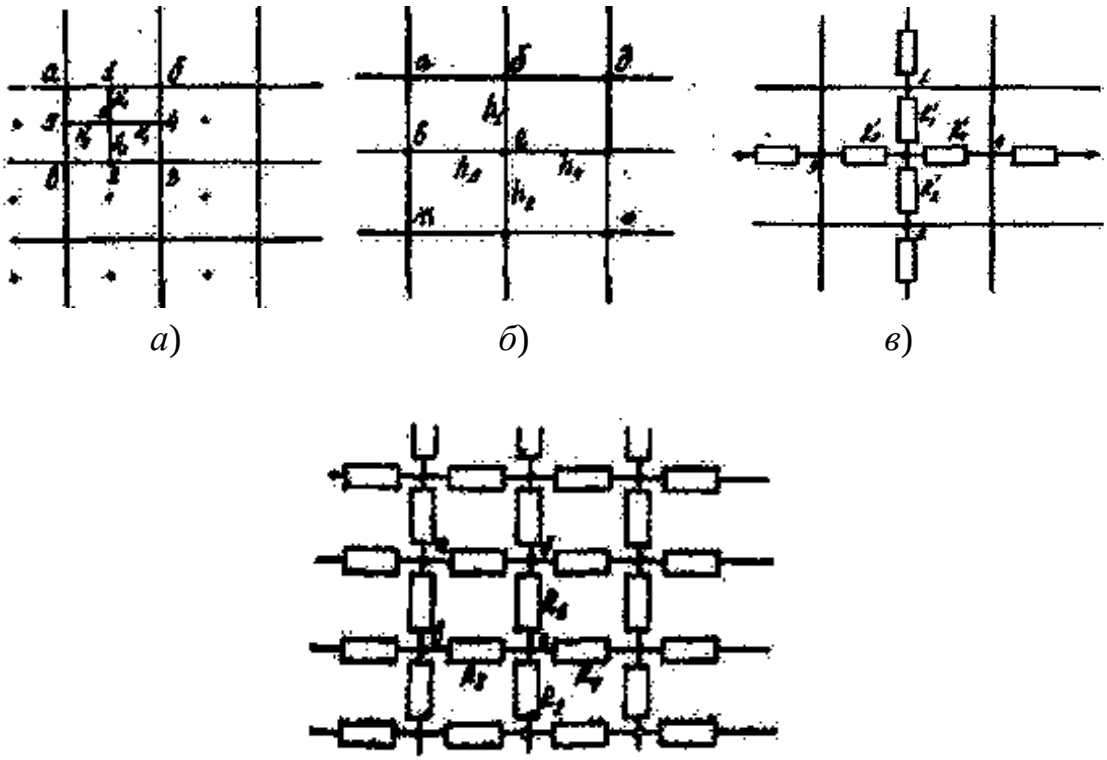
Выбрав ту или иную схему замещения, разделим моделируемую область на элементарные объемы для объемной задачи или на прямоугольники для плоской задачи таким образом, чтобы граничные узлы электрической сетки совпали с границами моделируемой области. Шаги деления вдоль всех осей координат считаем постоянными. Таким образом, получаем сеточную модель с параметрами сетки:

– для объемной задачи:

$$Rx = \frac{1}{\sigma_c}\frac{\Delta x}{\Delta y \cdot \Delta z};\quad Ry = \frac{1}{\sigma_c}\frac{\Delta y}{\Delta x \cdot \Delta z};\quad Rz = \frac{1}{\sigma_c}\frac{\Delta z}{\Delta x \cdot \Delta y};$$

– для плоской задачи:

$$Rx = \frac{1}{\sigma_c}\frac{\Delta x}{\Delta y};\quad Rx = \frac{1}{\sigma_c}\frac{\Delta x}{\Delta y}.$$



а) *б*) *в*)

г)

Рис. 164. Разбивка плоскости элементарными площадками:
а – сеткой с узлами внутри; *б* – сеткой с узлами в углах;
в, *г* – сеткой электрических сопротивлений для случаев
с узлами внутри и в углах

Здесь $\sigma_c = \sigma_\delta$ – удельная проводимость слоя. Если выбрать шаг по всем координатам один и тот же, то все внутренние сопротивления будут одинаковыми, т.е. $R_x = R_y = R_z$.

Рассмотрим температурное поле подложки гибридно-пленочной интегральной схемы, заключенной в корпусе (рис. 165).

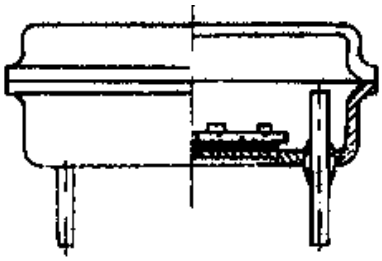


Рис. 165. Конструкция микросхемы

Чтобы получить тепловую модель этой микросхемы, введем ряд допущений:

1) активные элементы схемы рассматриваем как эквивалентные резисторы с той же рассеиваемой мощностью;

2) тепловым сопротивлением между пленкой резистора и подложкой пренебрегаем из-за наличия хорошего контакта;

3) коэффициент теплопроводности в исследуемом диапазоне температур считаем постоянным;

4) при расчете параметров электрической сетки тепловые сопротивления пленок не учитываем, считая, что пленки проводников резисторов оказывают незначительное влияние на распределение температуры по подложке из-за большого сопротивления тепловому потоку;

5) поверхность корпуса считаем изотермической поверхностью;

6) теплоотводом через выводы микросхемы пренебрегаем. При построении тепловой модели микросхемы необходимо считать конструкцию сложной структурой следующего вида:

- слой ковара толщиной 0,15 мм (нижняя часть корпуса);
- слой клея-мастики ЛН толщиной 0,1...0,2 мм (с помощью этого клея подложка крепится к корпусу);
- слой диэлектрика (обычно подложка выполнена из ситалла СТ-50-1);
- воздушный промежуток;
- слой ковара (крышка корпуса).

Расчеты говорят о том, что тепловое сопротивление воздушного промежутка более чем на два порядка больше теплового сопротивления подложки и клеевой прослойки, поэтому почти весь тепловой поток с верхней поверхности подложки с элементами бу-

дет направлен вниз к нижней части корпуса. Далее он рассеивается в основном за счет конвекции. Если микросхема установлена на плате, то в конвективном теплообмене участвует лишь верхняя часть корпуса.

Тепловая модель микросхемы – это плоская электрическая схема (рис. 166). Между узлами сетки и точкой *S*, которая соответствует изотермической поверхности корпуса, включены сопротивления R_C, моделирующие тепловые сопротивления подложки и клеевой прослойки по всей толщине. Между точкой *S* и общей точкой модели включено сопротивление R_S, которое моделирует конвективный теплообмен (корпус микросхемы – окружающая среда). В узлах электрической сетки включено сопротивление R_V, через которое вводятся токи, моделирующие внутренние источники тепла. Это сопротивление должно быть значительно больше сопротивлений R_x и R_y, чтобы последние не оказали влияния на величину вводимых токов.

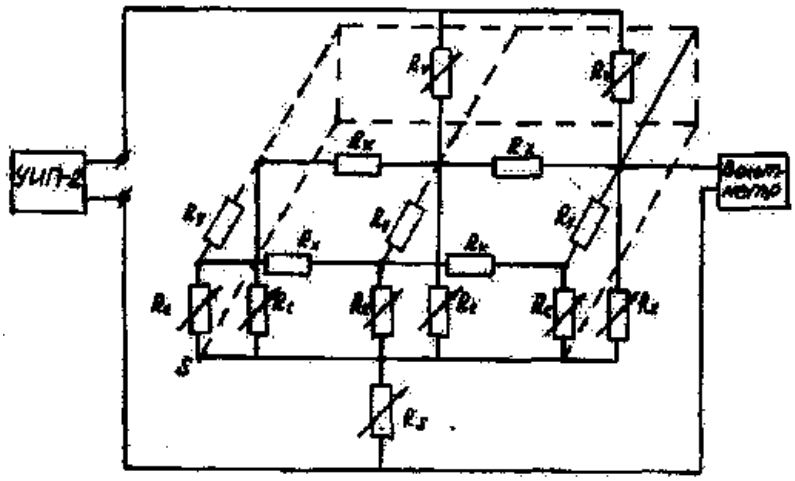


Рис. 166. Тепловая модель микросхемы

Значит,

$$i_v = U_v / R_v,$$

где U_v – напряжение питания модели; i_v – ток, вводимый в соответствующий узел электрической сетки. Величина тока i_v, вводимого в узел сетки, определяется мощностью тепловыделяющего элемента в этом узле P_v и масштабным коэффициентом подобия.

Из сказанного можно сделать вывод, что потенциалы узлов сетки, измеренные относительно общей точки модели, дают воз-

можность определить температуру перегрева поверхности подложки относительно окружающей среды, а потенциал точки *S*, тоже измеренный относительно общей точки модели, дает возможность определить температуру перегрева корпуса микросхемы относительно температуры окружающей среды.

Параметры сетки рассчитываются по формулам

$$R_x = \frac{k_\lambda \Delta x}{\lambda \delta \Delta x}; \quad R_x = \frac{k_\lambda \Delta y}{\lambda \delta \Delta y}.$$

Так как $\Delta x = \Delta y$; $R_x = R_y = R$, сопротивление сетки между узлами, лежащими на границах прямоугольной подложки, равно $2R$.

Сопротивление стоков на корпус

$$R_c = R_c' + R_c'';$$

$$R_x = \frac{k_\lambda \delta_1}{\lambda_1 \Delta x \Delta y}; \quad R_x = \frac{k_\lambda \delta_2}{\lambda_2 \Delta x \Delta y},$$

где $k_\lambda = \lambda / \delta$ – масштабный коэффициент подобия; δ_1 – толщина подложки; δ_2 – толщина слоя клея-мастики; λ_1 – коэффициент теплопроводности материала подложки; λ_2 – коэффициент теплопроводности клея-мастики.

Сопротивления, моделирующие теплообмен корпуса микросхемы с окружающей средой:

$$R_S = \frac{k\lambda}{\alpha S},$$

где S – поверхность корпуса, участвующая в конвективном теплообмене с окружающей средой; α – коэффициент теплоотдачи конвекцией между корпусом и средой (α = 25–30 Вт/м^2·град).

Имеется формула пересчета значений потенциалов узловых точек в значение температуры:

$$t = \frac{R_v P}{k_\lambda U_v} U,$$

где P – общая мощность всех тепловыделяющих элементов; R_v – сопротивление, равное параллельному соединению всех сопротивлений.

Данные для расчета следующие: размеры корпуса микросхемы, размеры подложки, толщина эпоксидного клея между полупроводниковым прибором и подложкой, толщина клея между подлож-

кой и корпусом, шаг сетки, материалы, теплофизические параметры материалов, общая мощность, которую выделяют все тепловыделяющие элементы.

Рассмотрим интерполяционные математические модели. Всякое исследование того или иного процесса имеет своей целью изучить механизм явления и найти оптимальные условия его протекания. Характерным для всех задач этого типа является то, что оптимизации подлежат сложные системы или части системы, у которых параметры оптимизации являются функциями большого числа переменных.

В настоящее время имеется два пути решения указанных задач. Согласно первому пути для оптимизации системы или процесса необходимо предварительное ее исследование, создание теории процесса или явления. Такой путь требует много времени и средств на изучение самого процесса. Кроме того, современные системы настолько сложны и работают в столь сложных условиях, что детальное их изучение в доступные сроки практически невозможно.

Второй путь предусматривает экспериментальный подход к оптимизированной системе, т.е. использование различных методов планирования эксперимента. Такие приемы планирования и проведения эксперимента позволяют добиться следующих преимуществ при оптимизации:

- уменьшить количество экспериментальной работы;
- не только оптимизировать систему, но и получить ее математическое описание или математическую модель, адекватную (соответствующую) опытным данным;
- вся схема исследования оказывается формализованной, информация, которая получается в процессе исследования, может гибко менять стратегию поиска оптимальных условий.

С точки зрения математики задача ставится следующим образом: проектирование объекта заключается в выборе модели исследования, обосновании выбранных параметров оптимизации и независимых переменных. Математическая модель объекта исследования может быть получена в виде уравнения связи выходного параметра Y объекта и входных независимых переменных x_1; x_2, ..., x_k. Уравнение связи является математическим описанием некоторой поверхности отклика в пространстве k сходных факторов и может быть задано функцией отклика

$$Y = f(x_1, x_2, ..., x_k), \qquad (82)$$

где Y – параметр, который подлежит оптимизации; x_1, x_2, ..., x_k – независимые переменные, далее называемые факторами.

Всевозможные наборы значений независимых переменных назовем k-мерным факторным пространством. Задача оптимизации состоит в том, чтобы найти такое значение вектора $x = (x_1, x_2, ..., x_k)$, которое оптимизирует в требуемом смысле функцию (82). Функцию отклика аппроксимируют полиномом вида

$$\eta = \beta_0 + \sum^{k} \beta_i x_i + \sum^{k} \beta_{ij} x_i x_j + \sum^{k} \beta_{ii} x_i^{\,2} + ..., \qquad (83)$$

где β_0, β_i, β_{ij}, β_{ii} – теоретические коэффициенты регрессии. Как правило, на практике ограничиваются конечным числом членов разложения, аппроксимируя неизвестную функцию отклика полиномом некоторой степени. Задача получения математической модели объекта или явления сводится к определению коэффициентов уравнения (83) по опытным данным.

Реальные объекты исследования подвержены действию возмущающих факторов различной природы, поэтому величина Y изменяется случайным образом, и уравнение (83) не дает возможности установить точную связь между входом и выходом объекта, а является лишь условным математическим ожиданием выходной переменной, т.е. уравнением связи является уравнение регрессии. Поэтому коэффициенты полинома, определенные в результате эксперимента, являются статистическими оценками соответствующих истинных значений, значит, в уравнении регрессии

$$Y = b_0 + \sum^{k} b_i x_i + \sum^{k} b_{ij} x_i x_j + \sum^{k} b_{ii} x_i^{\,2} + ..., \qquad (84)$$

где коэффициенты b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} являются оценками истинных значений коэффициентов β_0, β_i, β_{ij}, β_{ii} и т.д., а Y – расчетное значение параметра оптимизации.

Заключение

Развитие радиоэлектроники оказывает существенное влияние на научно-технический прогресс и успехи в социально-экономической области. Транспорт, энергетика, космические системы и другие направления нашей экономики, где велики последствия одного-единственного отказа, нуждаются в высоконадежных изделиях радиоэлектроники. Надежность этих изделий закладывается при их проектировании, обеспечивается при производстве и поддерживается при эксплуатации в составе радиоэлектронных средств. С другой стороны, изделия радиоэлектроники должны рассматриваться как совокупный результат разработки схемы, конструкции и технологии.

Современное производство радиоэлектронных средств представляет собой сложную пространственную динамическую систему с переменной структурой. Она имеет множественные внешние и внутренние связи. Современные производственные системы РЭС включают в себя подсистемы автоматизации планирования и управления, управленческие информационные системы, используемые в масштабе всего предприятия, а также интегрированные системы автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства.

Все многообразие РЭС чрезвычайно разнородно как по функциональному назначению, так и по конструктивному исполнению. Но насколько разнообразны конструкции устройств внешне, настолько они близки внутренне. При внимательном рассмотрении практически любого РЭС можно выделить определенное количество составных частей, которые по своему функциональному назначению будут общими для бесконечного множества других РЭС.

Учебник посвящен вопросам технологии производства радиоаппаратуры для радиосвязи, радиовещания, телевидения, радиолокации, радионавигации и других направлений науки и техники.

Развитие радиоэлектроники оказывает существенное влияние на научно-технический прогресс и успехи страны в социально-экономической области. Машиностроение, играющее ключевую роль в ускорении научно-технического прогресса, нуждается в надежно работающих сложных изделиях радиоэлектроники, органически входящих в качестве комплектующих элементов в станки с числовым программным управлением, роботы и другие устройства гибких производственных систем.

К достоинствам рукописи следует отнести полноту и доступность изложения. Материал представлен профессиональным техническим языком, уровень и стиль изложения соответствуют восприятию студентов и отражают основные требования и действующие программы курса «Технология радиоэлектронных средств».

Темы даны в соответствии с последовательностью, определенной ГОСом, и будут полезны прежде всего студентам радио- и приборостроительных специальностей, а также молодым специалистам.

Основные разделы учебника изложены весьма подробно и логично, основываются на глубоком знании основ электроники, радиотехники, системотехники, физико-химических основ технологии РЭС.

Целесообразность подготовки данного учебника обусловлена также тем, что доступность современной технической литературы по данному направлению для студентов сокращается, следовательно, подготовка учебника, включающего в себя всю совокупность учебно-методических вопросов, представляется весьма полезной.

Библиографический список

1. А.с. 563614 СССР. Вихретоковый преобразователь / В. И. Рогачев, В. В. Сухоруков, П. Н. Шкатов. – БИ; 1977. – Бюл. № 24.

2. А.с. 563615 СССР. Токовихревой преобразователь / В. И. Рогачев, В. В. Сухоруков и др. – БИ; 1977. – Бюл. № 24.

3. А.с. 634084 СССР. Устройство для контроля металлизированных отверстий печатных плат / В. Д. Орлов, В. И. Широков, Э. П. Максаков [и др.].

4. Виноградов, С. С. Оборудование и организация гальванических производств : учеб. пособие / под ред. В. Н. Кудрявцева. – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2001.

5. Волк, М. Герметизация электротехнической и радиоэлектронной аппаратуры / М. Волк, Ж. Леффордж, Р. Стенсон. – М. ; Л. : Энергия, 1966.

6. Гель, П. П. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры : учеб. для вузов / П. П. Гель, Н. К. Иванов-Есипович. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984.

7. Городов, В. А. Методы электрического контроля печатных плат / В. А. Городов // Технологии в электронной промышленности. – 2005. – № 1.

8. ГОСТ 23661. Платы печатные многослойные. Требования к типовому технологическому процессу прессования.

9. Дьюкс, Дж. М. Печатные схемы, их конструирование и применение / Дж. М. Дьюкс. – М. : Иностранная литература, 1963.

10. Ильин, В. А. Химические и электрохимические процессы в производстве печатных плат. Приложение к журналу «Гальванотехника и обработка поверхности» / В. А. Ильин. – Вып. 2. – М., 1994.

11. Карпов, С. В. Проблемы контроля многослойных печатных плат / С. В. Карпов // Радиотехника. – 2003. – № 3. – С. 74–85.

12. Котов, Е. П. Автоматизация процесса прессования многослойных печатных плат / Е. П. Котов, М. Махмудов, Л. И. Жак. – М. : Радио и связь, 1986.

13. URL: http://www.pcbfab.ru

14. URL: http://www.new-system.com

15. Медведев, А. М. Надежность и контроль качества печатного монтажа / А. М. Медведев. – М. : Радио и связь, 1986.

16. Медведев, А. М. Обновление технологий в российской электронной промышленности / А. М. Медведев // Технологии в электронной промышленности. – 2005. – № 1.

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

18. Медведев, А. М. Технология производства печатных плат / А. М. Медведев // Техносфера. – 2005. – 360 с.

19. Новокрещенов, С. В. Выбор режущего инструмента / С. В. Новокрещенов // Технологии в электронной промышленности. – 2005. – № 1.

20. Приходько, И. Тестирование печатных плат / И. Приходько // Электронные компоненты. – 2003. – № 3.

21. Технология многослойных печатных плат / А. А. Федулова, Ю. А. Устинов [и др.]. – М. : Радио и связь, 1990.

22. Ультразвук: Маленькая энциклопедия / под ред. И. П. Голямина. – М. : Сов. радио, 1980.

23. Уразаев, В. Г. Влагозащита печатных узлов / В. Г. Уразаев. – М. : Техносфера, 2006. – 344 с.

24. Ханке, Х.-И. Технология производства радиоэлектронной аппаратуры : пер. с нем. / Х.-И. Ханке, Х. Фабиан. – М. : Энергия, 1980.

25. Технология радиоэлектронных средств : учеб. пособие / Н. К. Юрков, А. К. Гришко, Л. А. Тюрина, М. В. Чернецов ; под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2007. – 344 с.

Учебное издание

Юрков Николай Кондратьевич

Технология радиоэлектронных средств

Редактор *В. В. Чувашова*
Корректор *Н. А. Сидельникова*
Компьютерная верстка *Р. Б. Бердниковой*

Подписано в печать 12.05.12. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 37,2. Тираж 500.
Заказ № 387.

Издательство ПГУ.
440026, Пенза, Красная, 40.
Тел./факс: (8412) 56-47-33; e-mail: iic@pnzgu.ru


ПензГУ