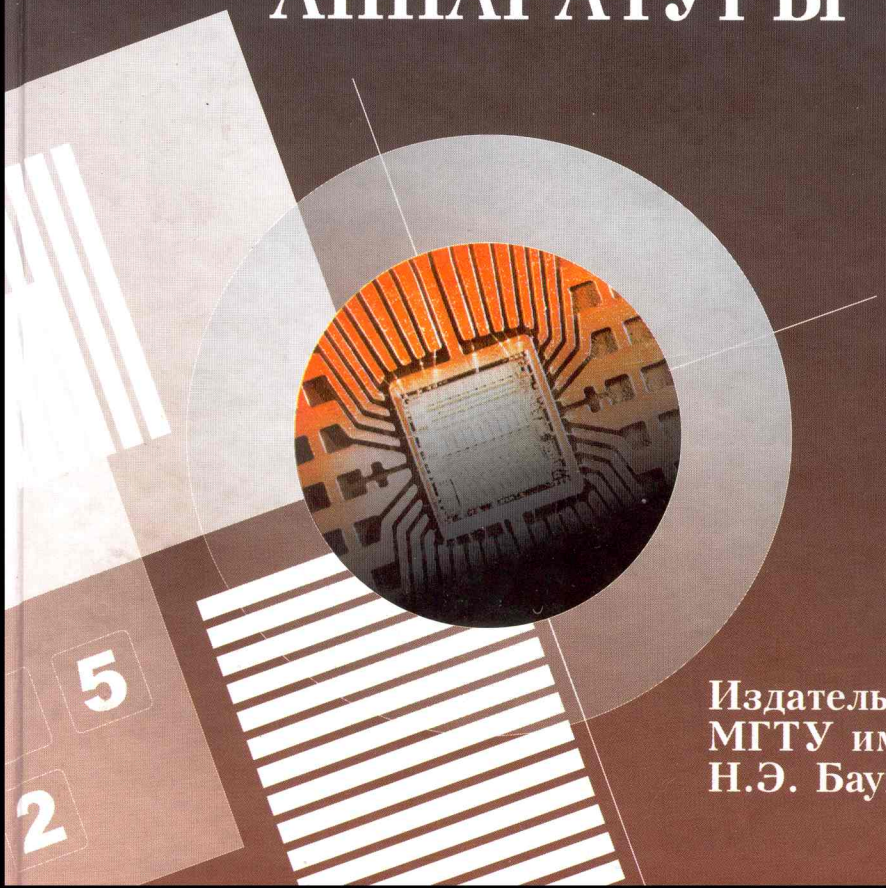
Информатика в техническом университете

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ



Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана

Серия основана в 2000 году

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

д-р техн. наук *И.Б. Федоров* — главный редактор
д-р техн. наук *И.П. Норенков* — зам. главного редактора
д-р техн. наук *Ю.М. Смирнов* — зам. главного редактора
д-р техн. наук *В.В. Девятков*
д-р техн. наук *В.В. Емельянов*
канд. техн. наук *И.П. Иванов*
д-р техн. наук *В.А. Матвеев*
канд. техн. наук *Н.В. Медведев*
д-р техн. наук *В.В. Сюзев*
д-р техн. наук *Б.Г. Трусов*
д-р техн. наук *В.М. Черненький*
д-р техн. наук *В.А. Шахнов*

Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры

Под редакцией заслуженного деятеля науки РФ,
профессора В.А. Шахнова

Допущено Министерством образования Российской Федерации в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети» направления подготовки дипломированных специалистов «Информатика и вычислительная техника» и специальности «Биотехнические и медицинские аппараты и системы» направления подготовки дипломированных специалистов «Биомедицинская техника»

Москва
Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана
2002

УДК 681.321(075.8)
ББК 32.971
К 65

Рецензенты:
профессор И.Г. Мироненко (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет);
кафедра «Конструирование и технология радиоэлектронных средств» Владимирского государственного университета (зав. кафедрой профессор М.В. Руфицкий)

Авторы:
К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева, Э.В. Мысловский, О.Д. Парфенов, Е.В. Пирогова, В.А. Шахнов, В.В. Шерстнев

К 65 **Конструкторско**-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов / К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева и др. Под общ. ред. В.А. Шахнова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 528 с.: ил. — (Сер. Информатика в техническом университете.)

ISBN 5-7038-1765-X

Изложены общие принципы организации проектирования электронной аппаратуры различного назначения, рассмотрены задачи конструкторского и технологического проектирования: обеспечение надежной работы аппаратуры, правила конструирования, технологические процессы формообразования, изготовление коммутационных плат, сборки и монтажа, наладки и испытания. Приведены общие правила проектирования интегральных микросхем и технологические методы их изготовления. Рассмотрены проблемы эргодизайна при проектировании электронной аппаратуры.

Содержание учебника соответствует курсу лекций, который авторы читают в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов высших технических учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки дипломированных специалистов «Информатика и вычислительная техника», «Биомедицинская техника». Будет полезен всем, занимающимся созданием электронной аппаратуры различного назначения.

УДК 681.321(075.8)
ББК 32.971

ISBN 5-7038-1765-X

© Коллектив авторов, 2002
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 8
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ 10
ВВЕДЕНИЕ 12
1. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ 14
1.1. Этапы разработки электронной аппаратуры 14
1.2. Техническая документация 18
1.3. Схемная документация 25
1.4. Показатели конструкции ЭА 32
2. УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КОНСТРУКЦИЮ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ 35
2.1. Внешние факторы, влияющие на работоспособность ЭА 35
2.2. Объекты установки ЭА и их характеристики 44
2.3. Требования, предъявляемые к конструкции ЭА 48
3. КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ, УЗЛОВ И УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ 54
3.1. Модульный принцип конструирования, конструктивная иерархия элементов, узлов и устройств 54
3.2. Стандартизация при модульном конструировании 58
3.3. Модули нулевого уровня 59
3.4. Микросборки 62
3.5. Модули первого уровня 63
3.6. Модули второго уровня 67
3.7. Модули третьего уровня 77
3.8. Рамы 82
4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ КОНСТРУКЦИИ ЭА 84
4.1. Защита конструкции от механических воздействий 84
4.2. Защита ЭА от воздействия влажности 99
4.3. Защита от воздействия пыли 103
4.4. Герметизация ЭА 105
4.5. Защита от температурных воздействий 109

4.6. Защита конструкции от воздействия помех ... 122
4.7. Надежность конструкции ЭА ... 132
5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ ... 142
5.1. Виды электрических соединений в ЭА ... 142
5.2. Конструкции сигнальных ЛП ... 153
5.3. Волоконно-оптические ЛП ... 161
5.4. Конструирование линий электропитания ... 165
5.5. Конструирование заземления ... 169
5.6. Электрические контакты в ЭА ... 173
6. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ... 181
6.1. Основные понятия ... 181
6.2. Виды технологических процессов ... 184
6.3. Этапы разработки технологических процессов ... 185
6.4. Технологические процессы и качество ЭА ... 198
6.5. Качество поверхности деталей ... 210
6.6. Производительность труда и норма штучного времени ... 212
6.7. Технологическая себестоимость ... 216
6.8. Выбор наиболее экономичного варианта ТП по себестоимости ... 217
7. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОСХЕМ ... 219
7.1. Общие сведения о микросхемах и технологии их изготовления ... 219
7.2. Изготовление монокристалла полупроводникового материала ... 221
7.3. Резка монокристалла и получение пластин ... 222
7.4. Изготовление фотошаблонов ... 223
7.5. Полупроводниковые микросхемы ... 223
7.6. Легирование методом термической диффузии примесей ... 225
7.7. Легирование методом ионной имплантации ... 231
7.8. Проектирование полупроводниковых резисторов в ИМС ... 236
7.9. Фотолитография ... 236
7.10. Расчет топологических размеров областей транзистора ... 246
7.11. Осаждение тонких пленок в вакууме ... 247
7.12. Тонкопленочные резисторы ... 254
7.13. Основы толстопленочной технологии ... 257
7.14. Коммутационные платы микросборок ... 262
7.15. Крепление подложек и кристаллов ... 265
7.16. Электрический монтаж кристаллов ИМС на коммутационных платах микросборок ... 273
7.17. Герметизация микросхем и микросборок ... 280
8. ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ ... 296
8.1. Общие сведения о печатных платах ... 296
8.2. Материал печатных плат ... 303
8.3. Изготовление оригиналов и фотошаблонов ... 307

8.4. Технологические процессы изготовления печатных плат 311
8.5. Основные технологические этапы в производстве печатных плат 326
9. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И ФОРМООБРАЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ 344
9.1. Обработка резанием деталей ЭА 344
9.2. Изготовление деталей ЭА методом литья 357
9.3. Изготовление деталей ЭА холодной штамповкой 360
9.4. Изготовление деталей из пластмасс для ЭА 365
9.5. Электрофизические и электрохимические методы обработки деталей 370
10. СБОРКА И МОНТАЖ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ 376
10.1. Сборочно-монтажные операции 376
10.2. Сборка и монтаж модулей первого уровня 379
10.3. Технология монтажа объемных узлов 391
10.4. Размещение ленточных проводов в ЭА 404
11. РЕГУЛИРОВКА, НАСТРОЙКА, КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ 412
11.1. Технологические операции регулировки и настройки 412
11.2. Контроль, диагностика ЭА 420
11.3. Виды неисправностей ЭА и их устранение 433
11.4. Испытания ЭА 444
12. ЭРГОДИЗАЙН ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ 464
12.1. Характеристика человека-оператора как звена в единой системе человек—машина 467
12.2. Организация рабочего места при эксплуатации ЭА 487
12.3. Проектирование эргономичных узлов и устройств ЭА 501
12.4. Основы художественного проектирования ЭА 515
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 522
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 524
Предметный указатель 526

Бывшим, настоящим и будущим студентам Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана посвящается

ПРЕДИСЛОВИЕ

Роль и значение работ, связанных с разработкой конструкции и технологии производства, в общем процессе создания электронной аппаратуры (ЭА) все более возрастает. Это связано, с одной стороны, с ростом степени интеграции применяемой микроэлектронной элементной базы, что требует новых подходов к решению задач компоновки, помехоустойчивости, обеспечения нормальных тепловых режимов и высокой надежности. С другой стороны — расширением сфер применения ЭА, что требует использования современных методов конструирования и технологических процессов, обеспечивающих оптимальное сочетание необходимых эксплуатационных и экономических характеристик. Поэтому от правильного решения конструкторских и технологических проблем при проектировании ЭА зависят в конечном итоге ее потребительские качества.

Разработчики (инженеры-системотехники, инженеры-схемотехники, программисты, специалисты по сетям и техническому обслуживанию) при решении специфических задач должны хорошо ориентироваться в вопросах построения конструкции, разработки технологических процессов и организации производства ЭА. Это позволит получать не только самые совершенные **эксплуатационные** показатели создаваемой ЭА, но и обеспечит возможность организации ее производства с применением передовых технологий и достижением высоких **экономических** показателей.

Предлагаемая вниманию читателя книга отражает современные тенденции разработки конструкции и технологии изготовления электронной аппаратуры, микроэлектронных элементов и устройств, электронной аппаратуры различного назначения: радиоэлектронной, электронно-вычислительной, транспортируемой, бытовой, медицинской (только электронной ее части). В ней приведены наиболее общие сведения по этим проблемам, по мнению авторов достаточные для схемотехников, системотехников, программистов, конструкторов и технологов. Материалы книги базируются на лекциях, читаемых авторами по различным разделам конструкторских и технологических дисциплин студентам соответствующих специальностей.

Следует отметить, что под термином «электронная аппаратура» авторами подразумевается любой тип радиоэлектронной, электронно-вычислительной и управляющей аппаратуры, построенной с использованием микроэлектронной элементной базы. В книге не приводятся особенности проектирования СВЧ-техники. Это — предмет особого рассмотрения. В современной учебной и научно-технической литературе широко применяются термины «радиоэлектронная аппаратура», «компьютер», «электронная вычислительная машина — ЭВМ», «электронно-вычислительная аппаратура — ЭВА», «электронно-вычислительные средства — ЭВС», «радиоэлектронные средства», «биомедицинская аппаратура» и др. Принципиальных различий между этими терминами с точки зрения конструкторско-технологического проектирования нет. Поэтому в дальнейшем изложении авторы используют термин **«электронная аппаратура — ЭА».**

Материал книги распределяется между авторами следующим образом: общая редакция, главы 1, 2 и заключение — д-р техн. наук, проф. В.А. Шахнов; главы 3, 4 и 5 — канд. техн. наук, доц. В.В. Шерстнев; главы 6, 9 и 10 — канд. техн. наук, доц. К.И. Билибин; глава 7 (кроме § 7.19) — канд. техн. наук, доц. О.Д. Парфенов; глава 8 — канд. техн. наук, доц. Е.В. Пирогова; глава 11 — канд. техн. наук, проф. Э.В. Мысловский; глава 12 — канд. техн. наук, доц. А.И. Власов; § 7.19 — канд. техн. наук, доц. Л.В. Журавлева.

Подготовка к изданию этой книги была бы невозможной без всесторонней и доброжелательной помощи сотрудников кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Глубокую благодарность авторы выражают рецензентам: заслуженному деятелю науки Российской Федерации, заведующему кафедрой Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, д-р техн. наук, проф. И.Г. Мироненко и коллективу кафедры «Конструирование и технология радиоэлектронных средств» Владимирского государственного электротехнического университета (зав. каф. д-р техн. наук, проф. М.В. Руфицкий), чьи замечания способствовали улучшению содержания книги.

Авторы будут признательны читателям за все замечания по содержанию книги, которые следует направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Шахнов В.А.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АСТПП — автоматизированная система технологической подготовки производства
АСУ — автоматизированная система управления
АСУ ТП — автоматизированная система управления технологическими процессами
АЧХ — амплитудно-частотная характеристика
БИС — большая интегральная схема (микросхема)
БНК — базовая несущая конструкция
ГПК — гибкий печатный кабель
ГПП — гибкая печатная плата
ГПС — гибкая производственная система
ГСС — генератор стандартных сигналов
ДПП — двусторонняя печатная плата
ЕСДП — единая система допусков и посадок
ЕСЗКС — единая система защиты изделий и материалов от коррозии, старения и биоповреждений
ЕСКД — единая система конструкторской документации
ЕСТД — единая система технологической документации
ЕСТПП — единая система технологической подготовки производства
ЖКИ — жидкокристаллический индикатор
ЗУ — запоминающее устройство
ЗУПВВ — запоминающее устройство с произвольной выборкой информации
ИВЭП — источник вторичного электропитания
ИМС (МС) — интегральная микросхема (интегральная схема)
ИСЗ — искусственный спутник Земли
КД — конструкторская документация
КС — конструкционная система
КСГ — комплексная система гашения
ЛП — линия передачи
ЛЭП — линия электропитания
ММСО — метод металлизации сквозных отверстий
МП — микропроцессор
МПП — многослойная печатная плата
НИР — научно-исследовательская разработка
НК — несущая конструкция
НТД — нормативно-техническая документация

ОЗУ — оперативное запоминающее устройство
ОКГ — оптический квантовый генератор
ОКР — опытно-конструкторская разработка
ОПП — односторонняя печатная плата
ОТК — отдел технического контроля
ПЗУ — постоянное запоминающее устройство
ПИ — программа испытаний
ПСИ — приемосдаточные испытания
ПП — печатная плата
ПЭ — потребитель электроэнергии
ПЭВМ — персональная электронная вычислительная машина (компьютер)
РНО — регулировочные и настроечные операции
РП — рельефные платы
САГ — система активного гашения
САПР — система автоматизированного проектирования
СБ — сборочный чертеж
СБИС — сверхбольшая интегральная схема (микросхема)
СВЧ — сверхвысокие частоты
СГ — система гашения
СНИП — санитарные нормы и правила
СО — система охлаждения
СпИС — специализированная интегральная схема (микросхема)
СПФ — сухой пленочный фоторезист
СТ МЭК — стандарт Международной электротехнической комиссии
ТД — технологическая документация
ТЗ — техническое задание
ТК — технический контроль
ТКР — температурный коэффициент расширения
ТП — технологический процесс
ТТЛ — транзисторно-транзисторная логика
ТУ — технические условия
ТЭЗ — типовой элемент замены
УГО — условное графическое обозначение
ФЧХ — фазочастотная характеристика
ФШ — фотошаблон
ЧПУ — числовое программное управление
ЭА — электронная аппаратура
ЭВА — электронно-вычислительная аппаратура
ЭВМ — электронная вычислительная машина (компьютер)
ЭВС — электронно-вычислительные средства
ЭЛТ — электронно-лучевая трубка
ЭП — эскизный проект
ЭРЭ — электрорадиоэлемент

ВВЕДЕНИЕ

Конструкция (лат. *constructio* — строение, устройство, построение, план, взаимное расположение частей), англ. — *construction*, нем. — *die Konstruktion*, фр. — *construction*.

Технология (греч. *techne* — искусство, мастерство + *logos* — понятие, учение), англ. — *technology*, нем. — *die Technologie*, фр. — *technologie*.

Под **конструкцией** ЭА понимается совокупность элементов и деталей с различными физическими свойствами и формами, находящихся в определенной пространственной, механической, тепловой, электромагнитной и энергетической взаимосвязи. Эта взаимосвязь определяется электрическими схемами и конструкторской документацией и обеспечивает выполнение электронной аппаратурой заданных функций с необходимой точностью и надежностью в условиях воздействия на нее различных факторов: эксплуатационных, производственных, человеческих.

Технология производства, или **технологический процесс** — основная часть производственного процесса, заключающаяся в выполнении определенных действий, направленных на изменение исходных свойств объекта производства (в нашем случае ЭА) и достижение им определенного состояния, соответствующего технической (конструкторской) документации.

Конструирование и технология производства являются, с одной стороны, отдельными частями сложного процесса разработки ЭА, а с другой, не могут выполняться в отдельности, без учета взаимосвязей между собой и с другими этапами разработки. Являясь этапами более общего процесса: «разработка — производство — эксплуатация», как конструирование, так и технология определяют в конечном итоге общие потребительские свойства ЭА.

Выполнение рабочих функций ЭА характеризуется набором параметров X_i ($i = 1, ..., n$), конкретные величины и способы количественной оценки которых зависят от этапа разработки. Так, в техническом задании указываются обычно номинальные значения параметров ЭА X_i^0 ($i = 1, ..., n$). Влия-

ние конструкторской разработки, производственной среды, приемо-сдаточных и периодических испытаний приводит к появлению вероятностных (случайных) значений параметров X_i^j (i = 1, ..., n), которые являются результатом статистического анализа данных испытаний. Влияние условий эксплуатации приводит к случайному изменению параметров во времени $X_i(t)$ (i = 1, ..., n), конкретные значения которых могут отличаться от приведенных в техническом задании.

Строгий учет этих факторов требует от разработчика ЭА знаний по всем вопросам конструкторско-технологического проектирования:

- виды и порядок разработки технической документации;
- влияние внешних факторов на работоспособность ЭА;
- методы проектирования и изготовления микроэлектронных изделий;
- методы конструирования элементов, узлов и устройств ЭА;
- обеспечение электромагнитной совместимости, механической прочности, нормальных тепловых режимов и надежности;
- проектирование ЭА с учетом требований эргономики и технической эстетики;
- общие вопросы организации производства ЭА;
- стандартные и специальные технологические процессы в производстве ЭА;
- методы сборки и монтажа ЭА;
- методы регулировки, настройки и испытаний ЭА

и т. д.

Развитие информационных технологий и широкое их применение для проектирования различных изделий дает возможность разработчику ЭА использовать принципиально новые инструменты и подходы, что в конечном итоге отражается на сокращении сроков разработки, улучшении технических и снижении экономических показателей создаваемой ЭА.

Все эти проблемы представлены вниманию читателя в предлагаемой книге.

1. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

1.1. Этапы разработки электронной аппаратуры

Государственными стандартами РФ определен порядок разработки и постановки на производство продукции технического назначения, в том числе и ЭА. В частности, Государственным стандартом установлены следующие стадии разработки:

- техническое предложение;
- эскизный проект (ЭП);
- технический проект.

Основой для разработки является *техническое задание* (ТЗ), содержание которого устанавливает ГОСТ. В ТЗ излагаются назначение и область применения разрабатываемой ЭА, технические, конструктивные, эксплуатационные и экономические требования к ЭА, условия по ее хранению и транспортированию, требования по надежности, правила проведения испытаний и приемки образцов в производстве.

На стадии *технических предложений* проводится анализ существующих технических решений, патентные исследования, проработка возможных вариантов создания ЭА, выбор оптимального решения, макетирование отдельных узлов ЭА, выработка требований для последующих этапов разработки.

На стадии *эскизного проектирования* осуществляют конструкторскую и технологическую проработку выбранного варианта реализации ЭА; изготавливается действующий образец или серия ЭА; проводятся их испытания в объеме, достаточном для подтверждения заданных в ТЗ технических и эксплуатационных параметров; организуется разработка в полном объеме необходимой конструкторской документации, которой присваивается литера «Э»; прорабатываются основные вопросы техноло-

гии изготовления, наладки и испытания элементов, узлов, устройств и ЭА в целом.

На стадии *технического проекта* принимаются окончательные решения о конструктивном оформлении ЭА и составляющих ее узлов, разрабатывается полный комплект конструкторской и технологической документации, которой присваивается литера «Т», изготавливается опытная серия ЭА, проводятся испытания ЭА на соответствие заданным в ТЗ техническим и эксплуатационным требованиям. Результаты технического проектирования являются основой для разработки полного комплекта рабочей конструкторской документации, которой присваивается литера «О».

В последующем осуществляется *технологическая подготовка производства*, выпуск установочной серии и организация серийного (массового) выпуска ЭА.

Стадии разработки ТЗ, технических предложений и ЭП включаются, как правило, в *научно-исследовательскую работу* (НИР), а стадии разработки технического проекта и технологической подготовки производства — в *опытно-конструкторскую разработку* (ОКР).

В последние годы применительно к продукции технического назначения используется термин **жизненный цикл**, под которым понимаются все этапы создания изделия, начиная с разработки ТЗ и кончая эксплуатацией готовых изделий с последующей утилизацией. Жизненный цикл ЭА, разделенный на этапы ее разработки, изготовления и эксплуатации, представлен на рис. 1.1. Здесь к эскизному проектированию можно отнести этапы 1—6, к техническому проекту – этапы 7—19. В двойную рамку на рис. 1.1 заключены те этапы, полное или частичное выполнение которых зависит от участия в их выполнении специалистов-конструкторов и специалистов-технологов.

Все вышесказанное относится к вновь создаваемой ЭА, основанной на использовании принципиально новых технических решений. В настоящее время в связи с развитием предприятий, специализирующихся на разработке и производстве отдельных узлов и устройств ЭА, появилась возможность существенного сокращения трудовых и временных затрат на создание крупносерийных или массовых изделий (так называемые *сборочная* или *«отверточная» технология*). В этом случае разработчикам ЭА необходимо тщательно подобрать комплектующие изделия, чтобы созданная ими аппаратура была технологичной в изготовлении, удобной в эксплуатации и конкурентоспособной, а также выполнить ряд работ, предусмотренных схемой на рис. 1.1, например, выпуск документации, проведение испытаний и т. д.

С развитием сети INTERNET широкие возможности для создателей ЭА открывает *CALS-технология* (Computer-Aided of Logistics Support) — стратегия промышленности, направленная на эффективное создание, обмен, управление и использование баз данных, поддерживающих жизненный цикл

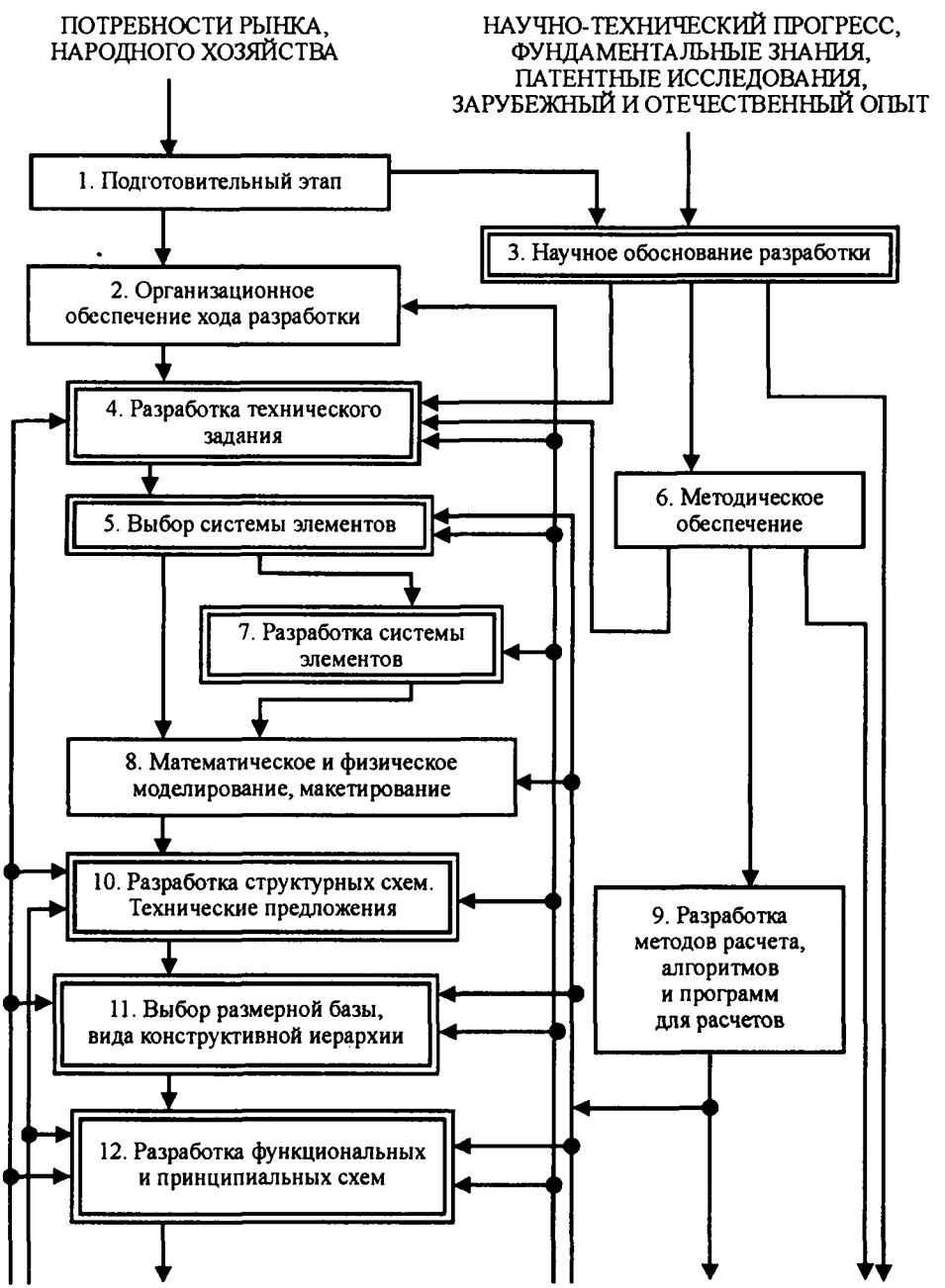
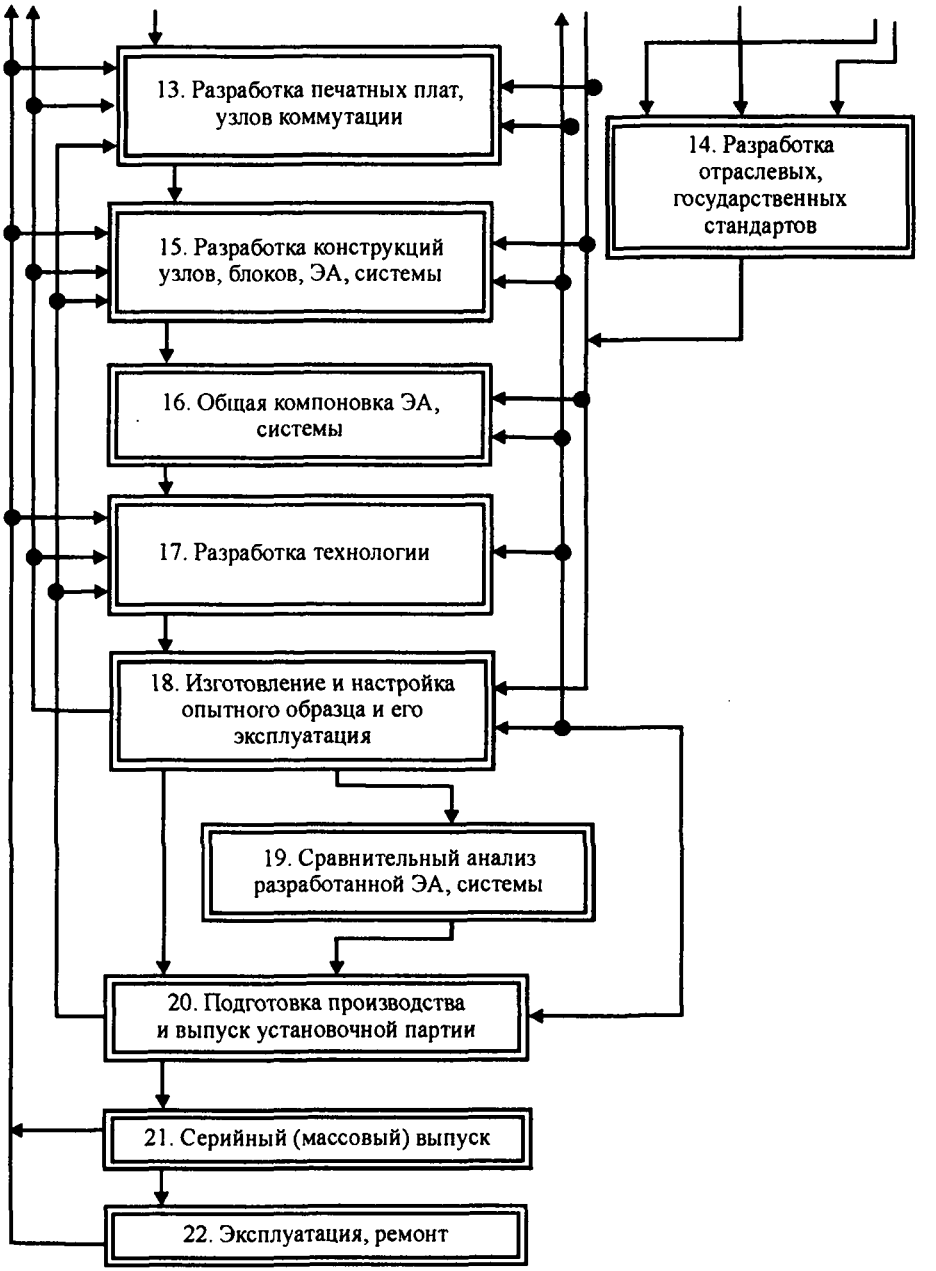


Рис. 1.1. Этапы разработки электронной аппаратуры



Окончание рис. 1.1

создаваемого изделия. Более подробно принципы организации и использования CALS-технологии рассмотрены в [12, 29, 36].

1.2. Техническая документация

На всех этапах жизненного цикла (разработка — производство — эксплуатация) ЭА сопровождает *техническая документация* (ТД). Состав этой документации и ее содержание регламентируется Государственными стандартами. В настоящее время в стране действует большое количество стандартов, которые сгруппированы по направлениям жизненного цикла изделий в следующие комплексы:

- единая система конструкторской документации (ЕСКД);
- единая система технологической документации (ЕСТД);
- единая система программной документации (ЕСПД);
- единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП);
- единая система защиты изделий и материалов от коррозии, старения и биоповреждений (ЕСЗКС) и др.

Основная задача стандартизации — обеспечить единую нормативно-техническую, информационную, методическую и организационную основу проектирования, производства и эксплуатации изделий. При этом обеспечивается использование единого технического языка и терминологии, взаимообмен документацией между предприятиями без ее переоформления, совершенствование организации проектных работ, возможность автоматизации разработки ТД с унификацией машинно-ориентированных форм документов, совершенствование способов учета, хранения и изменения документации и др.

Единая система конструкторской документации

Государственные стандарты, входящие в ЕСКД, устанавливают взаимосвязанные единые правила и положения по порядку разработки, оформления и обращения конструкторской документации на изделия, разрабатываемые и выпускаемые предприятиями всех отраслей промышленности.

Конструкторские документы (КД) — графические и текстовые документы, в отдельности или в совокупности определяющие состав и устройство изделия и содержащие необходимые данные для его разработки и изготовления, контроля, приемки, эксплуатации, ремонта, утилизации.

Стандартам ЕСКД присваивают обозначения по классификационному принципу. Номер стандарта составляется из цифры, присвоенной классу

стандартов ЕСКД, одной цифры после точки, обозначающей классификационную группу стандартов в соответствии с табл. 1.1, числа, определяющего порядковый номер стандарта в данной группе, и двузначной цифры (после тире), указывающей год регистрации стандарта. Например, обозначение стандарта ЕСКД «ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению» имеет вид: ГОСТ 2.701—84, т. е. ГОСТ — категория нормативно-технического документа (государственный стандарт), 2 — класс (стандарты ЕСКД), 7 — классификационная группа стандартов, 01 — порядковый номер стандарта в группе, 84 — год регистрации стандарта.

Таблица 1.1. **Классификационные группы стандартов в ЕСКД**

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

К графическим конструкторским документам относятся:

чертеж детали — изображение детали и другие данные, необходимые для ее изготовления и контроля;

сборочный чертеж (СБ) — изображение сборочных единиц и другие детали, необходимые для сборки и контроля;

чертеж общего вида (ВО) — определяет конструкцию изделия, взаимодействие его основных частей и поясняет принцип работы изделия;

теоретический чертеж (ТЧ) — геометрическая форма (обводы) изделия и координаты расположения основных частей;

габаритный чертеж (ГЧ) — контурное изображение изделия с габаритными, установочными и присоединительными размерами;

электромонтажный чертеж (ЭМ) — данные для электрического монтажа изделия;

монтажный чертеж (МЧ) — контурное изображение изделия и данные для его установки на месте эксплуатации;

установочный чертеж (УЧ) — данные для установки изделия;

схема — составные части изделия в виде условных изображений или обозначений и связи между ними;

К текстовым конструкторским документам относятся:

спецификация — определяет состав сборочной единицы, комплекса, комплекта;

ведомость спецификаций (ВС) — перечень всех спецификаций составных частей изделия с указанием их количества и входимости;

ведомость ссылочных документов (ВД) — перечень документов, на которые имеются ссылки в КД на изделие;

ведомость покупных изделий (ВП) — перечень покупных изделий, примененных в разрабатываемом изделии;

ведомость разрешений применения покупных изделий (ВИ) — перечень покупных изделий, разрешенных к применению по ГОСТу;

ведомость держателей подлинников (ДП) — перечень организаций-хранителей подлинников примененных в изделии документов;

ведомость технического предложения (ВТ) — перечень документов, вошедших в техническое предложение;

ведомость эскизного проекта (ЭП) — перечень документов, вошедших в эскизный проект;

ведомость технического проекта (ТП) — перечень документов, вошедших в технический проект;

пояснительная записка (ПЗ) — описание устройства и принципа действия разработанного изделия, а также обоснование разработки;

технические условия (ТУ) — требования к изделию, его изготовлению, контролю качества, приемке и поставке;

программа и методика испытаний (ПМ) — технические данные, подлежащие проверке при испытании изделия, порядок и методы их контроля;

таблица (ТБ) — данные, сведенные в таблицу;

расчет (РР) — расчеты параметров и величин, например, расчет размерных цепей, расчет на прочность, расчет теплового режима и др.;

эксплуатационные документы — документы для использования при эксплуатации, обслуживании и ремонте изделия в процессе эксплуатации;

ремонтные документы — данные для проведения ремонтных работ на специализированных предприятиях;

инструкция (И) — указания и правила, используемые при изготовлении изделия (сборке, регулировке, контроле и т. п.);

патентный формуляр (ПФ) — документ, содержащий результаты патентного поиска, осуществленного при разработке изделия. В нем содер-

жится оценка патентоспособности, патентная чистота и технический уровень разработанного изделия, материала, процесса, метода.

Единая система технологической документации

Государственные стандарты, входящие в ЕСТД, устанавливают взаимосвязанные единые правила и положения по порядку разработки, оформления и обращения технологической документации, разрабатываемой и применяемой на предприятиях всех отраслей промышленности страны.

Технологические документы **(ТД)** — текстовые и графические документы, в отдельности или в совокупности определяющие порядок изготовления изделия, проведения процессов и содержащие необходимые данные для контроля и приемки изделий.

Так же как в ЕСКД стандартам ЕСТД присваиваются обозначения на основе классификационного принципа. Номер стандарта составляется из цифры 3, присвоенной классу стандартов ЕСТД, одной цифры после точки, обозначающей подкласс (цифра 1 для изделий машино- и приборостроения), одной цифры, соответствующей классификационной группе стандартов в соответствии с табл. 1.2, числа, определяющего порядковый номер стандарта в данной группе, и двузначной цифры (после тире), указывающей год регистрации стандарта. Например, обозначение стандарта «ЕСТД. Правила оформления документов контроля. Журнал контроля технологического процесса» имеет вид: ГОСТ 3.1505—75, то есть ГОСТ — категория нормативно-технического документа (государственный стандарт), 3 — класс (стандарты ЕСТД), 1 — изделие машино- или приборостроения, 5 — классификационная группа стандартов, 05 — порядковый номер стандарта в группе, 75 — год регистрации стандарта.

Виды и правила проектирования ТД определяются видом производства, на котором будут изготовляться или ремонтироваться изделия и его составные части. В машино- и приборостроении в зависимости от **назначения** производства можно разделить на основное, вспомогательное и опытное. *Основное производство* — производство товарной продукции, *вспомогательное* — производство средств, необходимых для обеспечения функционирования основного производства. *Опытное производство* — производство образцов, партий и серий изделий при проведении научно-исследовательских работ.

По **типу** производства разделяются на *единичное*, *серийное* и *массовое*.

По **организации** производства разделяют на *поточное*, *групповое* и *установившееся*.

По **уровню применяемых средств автоматизации и механизации** производства разделяют на *автоматизированное* и *механизированное*.

Таблица 1.2. **Классификационные группы стандартов в ЕСТД**

Шифр группы	Содержание стандартов в группе
0	Общие положения
1	Основополагающие стандарты
2	Классификация и обозначение технологических документов
3	Учет применяемости деталей и сборочных единиц в изделиях и средств технологического оснащения
4	Основное производство. Формы технологических документов и правила их оформления на процессы, специализированные по видам работ
5	Основное производство. Формы документов и правила их оформления на испытания и контроль
6	Вспомогательное производство. Формы технологических документов и правила их оформления
7	Правила заполнения технологических документов
8	Резервная
9	Информационная база

По **виду или признаку применяемого метода для изготовления (ремонта) изделия** различают: *литейное, прессовое, механообрабатывающее, термическое, сборочное, сварочное, гальваническое, лакокрасочное, полупроводниковое, вакуумное* и другие производства.

Стадии разработки ТД определяются этапами разработки КД на изделие. На конструкторском этапе «Техническое предложение» ТД не разрабатывается, на конструкторских этапах «Эскизный проект» и «Технический проект» ТД разрабатывается как «Предварительный проект». В отдельных отраслях промышленности существует «Директивная технологическая документация», предназначенная не для изготовления, а для выполнения предварительных расчетов различного рода задач (инженерно-технических, планово-экономических, организационных) в целях определения возможности размещения соответствующего заказа на том или ином предприятии.

Так как объем ТД при производстве изделий достаточно велик, все виды технологических документов классифицируют по назначению, носителю информации, виду вносимой информации, по принципу построения и специализации (рис. 1.2).

Основные технологические документы содержат различную информацию:

- о комплектующих составных частях изделия и применяемых материалах;
- о действиях, выполняемых исполнителями при проведении технологических процессов и операций;

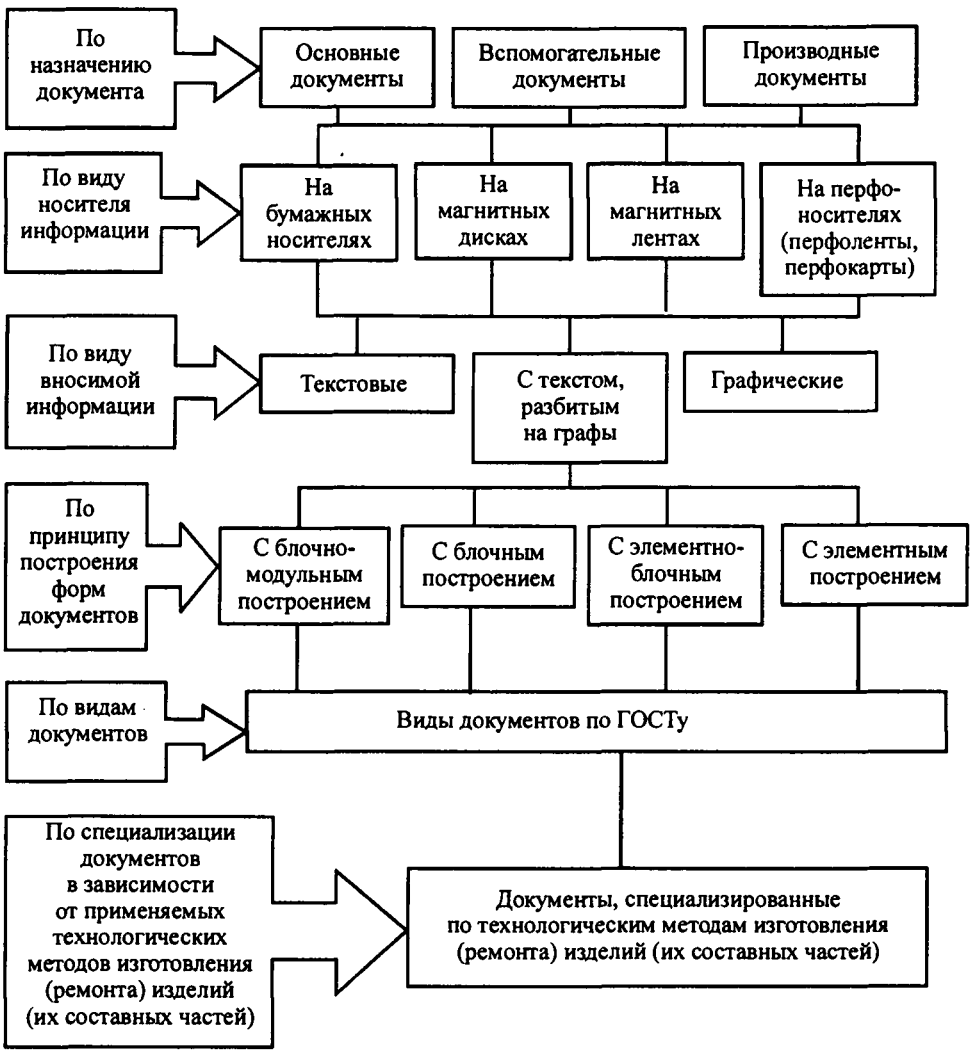


Рис. 1.2. Классификация технологических документов

- о средствах технологического оснащения производства;
- о наладке средств технологического оснащения и применяемых данных по технологическим режимам;
- о расчете трудозатрат, материалов и средств технологического оснащения;
- о технологическом маршруте изготовления и ремонте;
- о требованиях к рабочим местам, экологии окружающей среды и т. п.

Основные технологические документы используют, как правило, на рабочих местах. *Вспомогательные технологические документы* разрабатывают с целью улучшения и оптимизации организации работ по технологической подготовке производства. *Производные технологические документы* применяют для решения задач, связанных с нормированием трудозатрат, выдачей и сдачей материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий.

Различают следующие виды технологических документов:

ведомость технологических маршрутов (ВТМ) — сводная информация по технологическому маршруту изготовления изделия и его составных частей;

ведомость материалов (ВМ) — сводные подетальные нормы расхода материалов (основных и вспомогательных) на изделие;

ведомость специфицированных норм расхода материалов (ВСН) — сводные данные по специфицированным нормам расхода материалов на изделие;

ведомость удельных норм расхода материалов (ВУН) — удельные нормы расхода материалов, применяемых при выполнении процессов на покрытия;

ведомость применяемости деталей (сборочных единиц) в изделии (ВП) — указания о применяемости деталей (сборочных единиц) в изделии;

ведомость применяемости стандартных, покупных, оригинальных деталей и сборочных единиц (ВП/СОП) — то же, что и ВП;

ведомость сборки изделия (ВП/ВСИ) — порядок сборки изделия с учетом очередности входимости составных частей и их количества;

технологическая ведомость (ТВ) — указания по группированию деталей и сборочных единиц по конструкторско-технологическим или технологическим признакам;

ведомость технологических документов (ВТД) — полный состав технологических документов, применяемых при изготовлении изделия;

ведомость оснастки (ВО) — полный состав технологической оснастки, применяемой при изготовлении (ремонте) изделия;

ведомость оборудования (ВОБ) — полный состав оборудования, применяемого при изготовлении (ремонте) изделия;

технологическая инструкция (ТИ) — описание часто повторяющихся приемов работы, действий по наладке и настройке средств технологического оснащения, приготовлению растворов, электролитов, смесей и др., а также отдельных типовых и групповых технологических процессов (операций);

маршрутная карта (МК) — сводные данные по составу применяемых операций, оборудованию, технологических документов и по трудозатратам на технологический процесс;

операционная карта (ОК) — операционное описание единичных технологических операций;

паспорт технологический (ТП) — комплекс процедур по выполнению технологических операций исполнителями, технологическому контролю, контролю представителями заказчика или госприемки;

журнал контроля технологического процесса (ЖКТП) предназначен для контроля параметров технологических режимов, применяемых при выполнении операций на соответствующем оборудовании, и др.

Полный перечень видов технологических документов, а также их формы и правила построения читатель найдет в [17].

Особенности автоматизированного проектирования технической документации

При автоматизированном проектировании изделий конструкторские и технологические документы могут быть выполнены в визуальной форме, т. е. читаемые человеком, и в машинной (закодированной) форме, воспринимаемой только техническими средствами. Для документирования в системах автоматизированного проектирования используют различные носители информации: бумагу, перфокарты, перфоленты, магнитные ленты, магнитные и лазерные диски.

Учитывая неравномерность развития предприятий и различия в оснащенности их средствами САПР, допускается в комплекте документации на изделие иметь:

документы, выполненные традиционным способом, вручную;

документы на носителях разного вида;

документы в визуально воспринимаемой и машинной форме.

Документация, полученная в средствах САПР машинным способом, может быть направлена в соответствующую базу данных, а оттуда — на автоматизированное предприятие по изготовлению и испытанию изделий.

1.3. Схемная документация

В общем объеме КД, выпускаемой в процессе разработки изделий, в том числе ЭА, существенное место занимает схемная документация.

Схема — графическая конструкторская документация, на которой в виде условных изображений или обозначений показаны составные части изделия и связи между ними.

Схемы применяют при изучении принципа действия механизма, прибора, аппарата при их изготовлении, наладке и ремонте, для понимания связи между составными частями изделия без уточнения особенностей их кон-

струкции. Схемы являются исходным базисом для последующего конструирования отдельных частей и всего изделия в целом.

По виду элементов, входящих в состав изделия, связей между ними и назначения схемы подразделяют на виды (табл. 1.3) и типы (табл. 1.4). В соответствии с обозначениями, приведенными в таблицах, устанавливается код схемы. Так, схема Э3 — схема электрическая принципиальная, схема К2 — схема кинематическая функциональная и т. д.

Таблица 1.3. **Виды схем**

Наименование схемы	Обозначение
Электрические	Э
Гидравлические	Г
Пневматические	П
Газовые	Х
Кинематические	К
Вакуумные	В
Оптические	Л
Энергетические	Р
Комбинированные	С

Таблица 1.4. **Типы схем**

Наименование схемы	Обозначение
Структурные	1
Функциональные	2
Принципиальные	3
Соединений (монтажные)	4
Подключения	5
Общие	6
Расположения	7
Объединенные	0

Составляющими частями схем являются:

элемент схемы — составная часть схемы, которая не может быть разделена на части, имеющие самостоятельное значение (микросхема, резистор, трансформатор и др.);

устройство — совокупность элементов, представляющая единую конструкцию (блок, модуль). В ряде случаев устройство может не иметь определенного функционального назначения;

функциональная группа — совокупность элементов, выполняющих определенную функцию и не объединенных в единую конструкцию;

функциональная часть — элемент, устройство или функциональная группа, имеющие строго определенное функциональное назначение;

функциональная цепь — линия, канал на схеме, указывающие на наличие связи между функциональными частями изделия;

линия взаимосвязи — отрезок линии на схеме, указывающий на наличие связи между функциональными частями изделия;

линия электрической связи — линия на схеме, указывающая путь прохождения тока, сигнала и др.

При проектировании ЭА используются следующие виды схем:

структурные схемы (Э1), определяющие основной состав ЭА и ее функциональные части, их назначение и взаимосвязи. Их разрабатывают на началь-

ных стадиях проектирования ЭА, их используют как для разработки схем других типов, так и для общего ознакомления с ЭА;

функциональные схемы (Э2), поясняющие процессы, происходящие в отдельных функциональных частях и узлах ЭА. Они являются основой для разработки принципиальных схем и применяются при наладке, ремонте и эксплуатации ЭА;

принципиальные схемы (Э3), определяющие полный состав элементов и связей между ними и дающие полное представление о принципе работы отдельных узлов и устройств ЭА. Эти схемы являются основой для разработки полного комплекта конструкторской документации на ЭА;

схемы соединений (Э4), показывающие соединения составных частей ЭА и определяющие провода, жгуты, кабели и другие соединительные изделия, а также места их присоединения и ввода. Их используют как при выпуске КД на ЭА, так и при ее ремонте и эксплуатации;

схемы подключений (Э5), показывающие внешние подключения ЭА. Эти схемы используют при монтаже ЭА на месте эксплуатации и при ее ремонте;

общие схемы (Э6), определяющие составные части ЭА и соединения их между собой на месте эксплуатации;

схемы расположения (Э7), устанавливающие взаимное расположение отдельных устройств ЭА, а также соединяющих их жгутов, кабелей и т. д.

При проектировании схем любых видов необходимо придерживаться правил, изложенных в соответствующих стандартах. Так, для схем цифровой техники схемы электрические выполняются по правилам, установленным Государственными стандартами с использованием *условных графических обозначений* (УГО).

При большой графической насыщенности чертежей схем допускается делить поле листа на колонки, ряды, зоны или применять метод координат. При делении листа на зоны (рис. 1.3) колонки обозначают по верхней кромке листа слева направо порядковыми номерами с постоянным количеством знаков в номере (00, 01, 02, ..., 10, ..., 20), а ряды — по вертикали сверху вниз прописными буквами латинского алфавита. Ширину колонки принимают равной ширине минимального основного УГО элемента, а высоту ряда — основной минимальной высоте УГО. Обозначение зоны состоит из обозначения

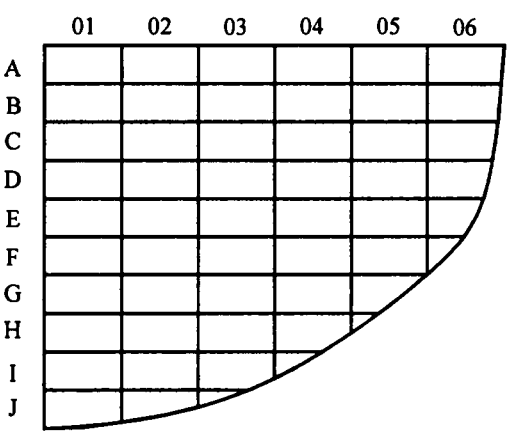


Рис. 1.3. Разметка поля чертежа

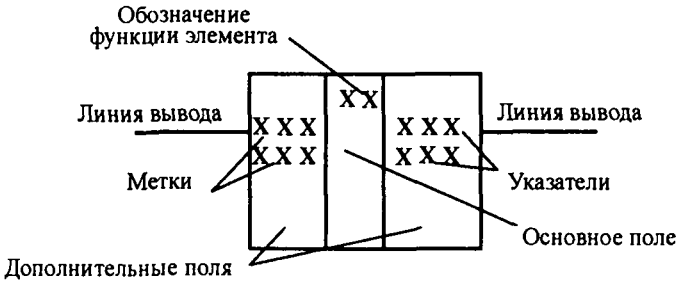


Рис. 1.4. УГО логического элемента

ряда и обозначения колонки, например, С03, К12. Электрические связи с входными выводами показывают входящими линиями листа схемы, начиная с левой стороны или сверху листа. Связи с выходящими выводами показывают выходящими линиями, заканчивая их на правой стороне или внизу листа.

УГО элементов строятся на основе прямоугольника. В общем виде УГО может содержать основное и два дополнительных поля (рис. 1.4). Размер прямоугольного поля по ширине зависит от наличия дополнительных полей и числа помещенных в них знаков (меток, обозначения функций элемента), по высоте — от числа выводов, интервалов между ними и числа строк информации в основном и дополнительных полях. Согласно стандарту ширина основного поля должна быть не менее 10 мм, дополнительных — не менее 5 мм (при большом числе знаков в метках и обозначении функций элемента эти размеры соответственно увеличивают), расстояние между выводами — 5 мм, между выводом и горизонтальной стороной обозначения — не менее 2,5 мм и кратно этой величине. При разделении групп выводов интервалом величина последнего должна быть не менее 10 мм и кратна 5 мм.

Выводы элементов делятся на входы, выходы, двунаправленные выводы и выводы, не несущие информации. Входы изображают слева, выходы справа, остальные выводы — с любой стороны УГО. При необходимости разрешается поворачивать УГО на 90° по часовой стрелке, располагая входы сверху, а выходы внизу.

Функциональное назначение элемента указывают в верхней части основного поля УГО. Его составляют из прописных букв латинского алфавита, арабских цифр и знаков, записываемых без пробела (число знаков в обозначении функции не ограничивается). Обозначения основных функций приведены в табл. 1.5.

В дополнительных полях условного графического обозначения элементов цифровой техники дается информация о функциональных назначениях выводов, указатели, метки (табл. 1.6).

Таблица 1.5. **Обозначения основных логических элементов**

Наименование функции	Обозначение	Наименование функции	Обозначение
И	&, И	Регистр	RG
ИЛИ	1	Регистр со сдвигом вправо	RG→
Сложение по модулю 2	M2	Регистр со сдвигом влево	RG←
Эквивалентность	=	Регистр с реверсным сдвигом	RG↔
Исключающее ИЛИ	–1	Одновибратор	S
«*n* и только *n*»	$-n$	Пороговый элемент	TH
Логический порог	$\geq n$	Формирователь сигнала	F
Мажоритарность	$\geq$ M	Вычислитель	CP
Дешифратор	DC	Процессор	P
Шифратор	CD	Память	M
Сравнение	– –	Управление	CO
Полусумматор	HC	Перенос	CR
Сумматор	SM	Прерывание	INR
Монтажное И	&, ◊	Передача	TF
Монтажное ИЛИ	1, ◊	Прием	RC
Кодовый преобразователь	X/Y	Ввод-вывод	IO
Триггер	T	Арифметика	A
Триггер двухступенчатый	TT	Мультиплексор	MUX
Счетчик:	CT	Демультиплексор	DMX
двоичный	CT2	Селектор	SL
десятичный	CT10	Дискриминатор	DIC или
Задержка	DL	Ключ	SW
Генератор	G	Нелогический элемент	*
Усилитель	▷		
Усилитель мощности	▷▷		

Для указания сложной функции допускается построение составной метки, образованной из основных меток. Например, функция «данные контрольные» отображается как DSO, «разрешение записи» — ERD, «строб считывания» — RDM.

Допускается в качестве меток вывода применять обозначения функции, порядковый номер, а также весовые коэффициенты разрядов. Для нумерации разрядов в группах выводов к обозначению метки добавляют номера разрядов. Позиционное обозначение элемента схемы в общем случае состоит из вида, номера и функции элемента, записываемых подряд. Вид и номер элемента являются обязательной частью его буквенно-цифрового обозначения и присваиваются всем элементам и устройствам. Буквенные коды групп элементов схем приведены в табл. 1.7.

Таблица 1.6. **Обозначение выводов**

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Установка:		Считывание	RD
в состояние «*n*»	S_n	Условный бит (флаг)	FL
в состояние «1»	S	Условие	CC
в состояние «0»	R	Шина	B
сброс	SR	Инверсия	IN
Разрешение установки универсального RS-триггера:		Байт	BY
		Бит	BIT
в состояние «1»	S	Запрет	DE
в состояние «0»	R	Буфер	BF
сброс	SR	Выбор	SE
Разрешение установки JK-триггера:		Готовность	RA
		Данные	D
в состояние «1»	J	Заем	BR
в состояние «0»	K	Запись	WR
Адрес	A	Запрос	RQ
Перенос	CR	Знак	SI
Переполнение	OF	Конец	END
Повтор	RP	Команда	INS
Приоритет	PR	Контроль	CH
Пуск	ST	Маркер	MR
Разрешение	E	Младший	LSB
Расширение	EX	Начало	BG
Сдвиг	→> ←<	Эмиттер:	
Синхронизация	SYN	общее обозначение	E
Строб, такт	C	NPN	E→ или E >
Ожидание	WI	PNP	E← или E <
Ответ	AN	База	B
Вывод питания от источника напряжения	U	Вывод для подключения:	
		емкости	C
Указатель питания цифровой части элемента		резистора	R
		индуктивности	L
Коллектор	U #	Вывод с состоянием высокого импеданса	
Состояние	K		◊ или L
Средний	SA	Открытый вывод	◊ или ¤
Старший	ML MSB		

В качестве примера на рис. 1.5 приведен фрагмент схемы электрической принципиальной, выполненной на интегральных микросхемах.

Правила разработки схем электрических других видов электронной аппаратуры определяются соответствующими стандартами [13, 15].

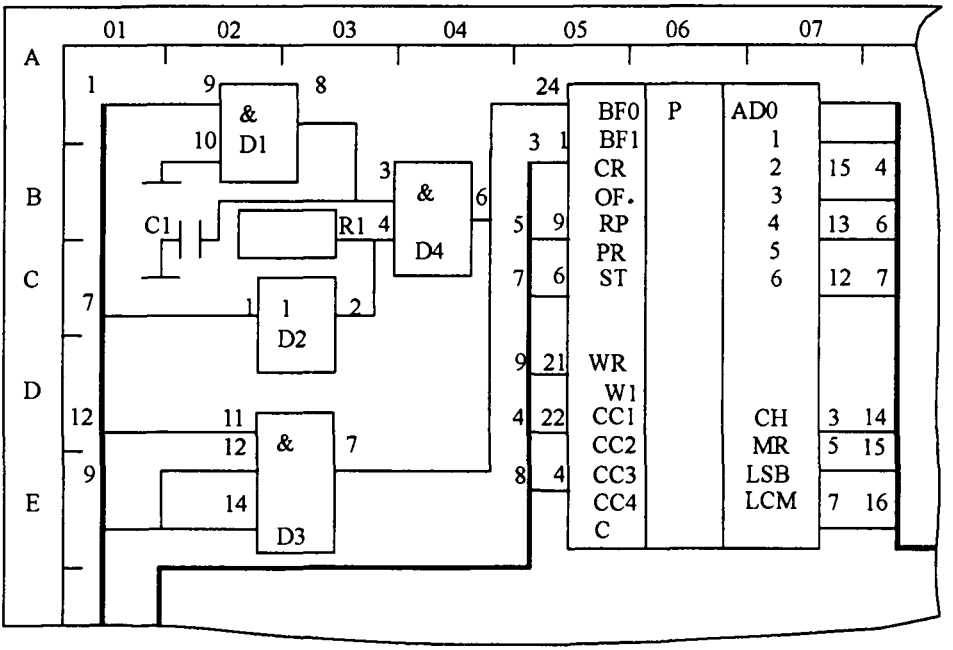


Рис. 1.5. Фрагмент схемы электрической принципиальной

Таблица 1.7. **Буквенные коды групп элементов**

Группа видов элементов	Первая буква кода	Группа видов элементов	Первая буква кода
Схемы интегральные, микросборки	D	Конденсаторы	C
Элементы разные	E	Резисторы	R
Предохранители	F	Приборы электровакуумные	V
Приборы измерительные	P	Катушки индуктивности, дроссели	L
Устройства коммутационные	S	Реле	K
Трансформаторы	T	Устройства индикационные и сигнальные	H
Соединители контактные	X	Генераторы	G

1.4. Показатели конструкции ЭА

Большое разнообразие имеющихся в эксплуатации и на рынке ЭА требует от разработчиков этого вида техники знания наборов показателей, по которым возможно сравнивать существующие модели ЭА с разрабатываемой. Безусловно, важнейшую роль при этом будут играть эксплуатационные и экономические показатели. С ними непосредственно связаны параметры, характеризующие ЭА как объект конструкторско-технологической разработки. К таким показателям следует в первую очередь отнести следующие:

Сложность конструкции ЭА

$$C_{\text{ЭВМ}} = K_1(K_2N_{\text{Э}} + K_3M_{\text{С}}), \tag{1.1}$$

где $N_{\text{Э}}$ — число составляющих ЭА элементов; $M_{\text{С}}$ — число соединений; K_1, K_2 и K_3 —масштабный и весовые коэффициенты соответственно.

Выражение (1.1) связывает число составляющих ЭА интегральных микросхем, полупроводниковых приборов, электрорадиоэлементов, элементов коммутации с числом разъемных и неразъемных соединений между ними, что определяет габариты, массу, надежность и другие общие параметры ЭА.

Число элементов, образующих ЭА,

$$N_{\text{Э}} = \sum_{j=1}^{N_{\text{у}}}\sum_{i=1}^{K_n} n_{ji}, \tag{1.2}$$

где $N_{\text{у}}$ — число устройств в ЭА; K_n — число типов применяемых элементов; n_{ji} — число элементов i-го типа, входящих в j-е устройство.

Объем ЭА

$$V = V_N + V_{\text{с}} + V_{\text{к}} + V_{\text{ут}},$$

где V_N — общий объем интегральных микросхем и электрорадиоэлементов, образующих ЭА; $V_{\text{с}}$ — объем, занимаемый всеми видами соединений; $V_{\text{к}}$ — объем несущей конструкции, обеспечивающей прочность и защиту ЭА при транспортировании и эксплуатации; $V_{\text{ут}}$ — объем теплоотводящего устройства.

Коэффициент интеграции, или *коэффициент использования физического объема*

$$q_{\text{и}} = V_N/V$$

характеризует степень использования физического объема ЭА элементами, выполняющими полезную функциональную нагрузку, т. е. непосредственно определяющими электрическую схему ЭА ($q_{\text{и}}$ всегда меньше 1 и приближается к ней с использованием больших интегральных схем).

Общая масса ЭА, определяемая как сумма масс, входящих в состав ЭА устройств:

$$m = m_N + m_C + m_н + m_{ут}$$

(обозначения в индексах аналогичны обозначениям в выражении (1.2)).

Общая мощность потребления ЭА

$$P = \sum_{j=1}^{N_y} p_j,$$

где p_j — мощность потребления j-го устройства. Для цифровых устройств потребляемая ими мощность зависит от средней мощности потребления электронных компонентов. Известно, что 80—90 % мощности потребления рассеивается в виде теплоты и определяет тепловой режим ЭА и соответствующие перегревы элементов конструкции.

Общая площадь, занимаемая ЭА,

$$S = \sum_{j=1}^{N_y} s_j,$$

где s_j — площадь, требуемая для эксплуатации j-го устройства ЭА.

Собственная частота колебаний конструкции (элемента, устройства или всей ЭА):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{m}},$$

где K — *коэффициент жесткости* конструкции; m — масса конструкции ЭА.

Степень герметичности конструкции ЭА, определяемая количеством газа, истекшем из определенного объема конструкции за известный отрезок времени:

$$D = \frac{V_0}{\tau_{сл}}\Delta P,$$

где V_0 — объем герметизированной части ЭА; $\tau_{сл}$ — срок службы ЭА; ΔP — избыточное давление газа в конструкции ЭА.

Вероятность безотказной работы ЭА $p(t)$ и *средняя наработка на отказ* $T_{ср}$ — показатели надежности ЭА.

Степень унификации ЭА

$$K_{ун} = \frac{N_{ун}}{N_э},$$

где $N_{ун}$ — количество унифицированных элементов, а $N_э$ — общее количество примененных в ЭА элементов.

Коэффициент автоматизации конструкторских работ

$$K_а = \frac{M_а}{M},$$

где $M_а$ — количество конструкторских работ, выполненных с применением ЭВМ; M — общее число конструкторских работ при проектировании ЭА.

Важнейшим параметром, определяющим большинство эксплуатационных, конструкторских и экономических характеристик разрабатываемой ЭА, является **технологичность**, общее понятие о которой приводится в гл. 6.

Контрольные вопросы

1. Роль стандартизации в технике конструирования ЭА.
2. Из каких разделов состоит техническое задание на разработку ЭА?
3. Чем определяются обратные связи в последовательности выполнения этапов разработки ЭА?
4. В чем заключается подготовка производства ЭА?
5. Может ли корректироваться техническое задание в процессе разработки ЭА?
6. Какие конструкторские документы относятся к группе текстовых?
7. Что определяют технические условия на ЭА?
8. В чем разница между функциональными и принципиальными схемами в случае использования больших интегральных схем?
9. Как выглядит условное графическое обозначение *RS*-триггера с динамическим входом?
10. Как обозначаются многопроводные сигнальные шины на электрических схемах?
11. Назначение электрической схемы соединений.
12. Как изменяется значение коэффициента интеграции для различных поколений ЭА?

2. УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КОНСТРУКЦИЮ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

2.1. Внешние факторы, влияющие на работоспособность ЭА

Условия эксплуатации ЭА и систем характеризуются комплексом параметров, называемых *внешними воздействующими факторами*, которые имеют различную физико-химическую природу и изменяются в весьма широких пределах. Эти факторы принято разделять на климатические, механические и радиационные.

К климатическим факторам относят: изменение температуры и влажности окружающей среды; тепловой удар; изменение атмосферного давления; наличие движущихся потоков пыли или песка; присутствие активных веществ в окружающей атмосфере; наличие солнечного облучения, грибковых образований (плесень), микроорганизмов, насекомых, грызунов; взрывоопасной и легковоспламеняющейся атмосферы; дождя и брызг; присутствие в окружающей среде озона.

К механическим факторам относят: воздействие вибраций, ударов, линейного ускорения, акустического удара.

К радиационным факторам относят: космическую радиацию; ядерную радиацию от реакторов, атомных двигателей, радиационно-опасных ситуаций; облучение потоком гамма-фотонов, нейтронов, бета-частиц, альфа-частиц, протонов, дейтронов.

Некоторые из перечисленных факторов могут проявлять себя независимо от остальных, а некоторые — в совместном действии с другими факторами. Например, наличие движущихся потоков песка неизбежно приводит к возникновению вибраций в элементах конструкции ЭА.

Так как электронно-вычислительная аппаратура принадлежит, как правило, к классу так называемых *человеко-машинных систем*, то важное

влияние на работоспособность ЭА оказывает человеческий (субъективный) фактор. Квалификация специалиста сказывается на качестве работы ЭА на всех этапах ее жизненного цикла. Несоблюдение правил проектирования, изготовления и эксплуатации ЭА приводит в конечном итоге к снижению их качества. Известно, что в ряде случаев число отказов аппаратуры увеличивается с ростом частоты осмотров и ремонта. Внедрение автоматизации на всех этапах создания ЭА уменьшает влияние человеческого фактора.

Климатические факторы

Нормальными климатическими условиями являются: температура +25±10 °С, относительная влажность 45...80 %, атмосферное давление (8,3...10,6) · 10^4 Па (630...800 мм рт. ст.), отсутствие активных веществ в окружающей атмосфере.

Совокупность воздействующих на конструкцию ЭА отдельных климатических факторов и их характеристики определяются той **климатической зоной**, в которой она эксплуатируется. Весь земной шар разделен на семь климатических зон, климат которых определяется как очень холодный, холодный, умеренный, тропически влажный, тропически сухой, умеренно холодный морской и тропический морской.

Очень холодный регион располагается в Антарктиде. Средняя минимальная температура в нем ниже –60 °С. Рекордной является зафиксированная в центральных районах Антарктиды на станции «Восток» температура –88,3 °С. Характерной особенностью этого региона является сочетание низких температур с сильным ветром.

В *холодную зону* включены большая часть России и Канады, Аляска, Гренландия. Средняя минимальная температура здесь достигает –50 °С, годовой перепад температур для некоторых районов составляет 80 °С, среднесуточный — до 40 °С. Особенностью для этой климатической зоны является наличие высокой прозрачности атмосферы, что благоприятно для ионизации воздуха и, как следствие, накоплению на поверхности аппаратуры статического электричества. Характерным также является обледенение, иней, ветер с мелкой снежной пылью.

В *умеренный климатический регион* включены часть территории России, бóльшая часть Европы, США, прибрежные территории Австралии, Южной Африки и Южной Америки. Для него характерно годовое изменение температур от –35 до +35 °С, образование инея, выпадение росы, наличие тумана, изменение давления воздуха от 86 до 106 кПа.

Влажная тропическая зона располагается вблизи экватора и включает бóльшую часть Центральной и Южной Америки, среднюю часть Африки,

Юг Индии, Индонезию, часть Юго-Восточной Азии. Для этой зоны характерны среднегодовые температуры +20...+25 °С с перепадом температуры за сутки не более 10 °С. Высокая влажность и повышенная концентрация солей (особенно вблизи побережья морей и океанов) делает атмосферу этой зоны коррозионно-агрессивной. В промышленных районах в атмосфере содержится сернистый газ и хлориды. Благоприятное сочетание температуры и влажности способствует существованию более 10000 видов плесневых грибков.

К *зоне с сухим тропическим* климатом относят северную часть Африки, центральную Австралию, засушливые районы Средней Азии, Аравийский полуостров, часть Северной Америки. Этот регион характеризуется высокими температурами (до +55 °С), низкой влажностью, интенсивным солнечным излучением (до 1500 Вт/м^2), высоким содержанием пыли и песка в атмосфере. Последнее способствует отрицательному абразивному и химическому воздействию на аппаратуру.

Умеренно холодная морская зона включает моря, океаны и прибрежные территории, расположенные севернее 30° северной широты и южнее 30° южной широты. Остальная часть морей, океанов и прибрежных территорий относится к *тропически морской зоне*. Климат морских зон отличается сравнительно небольшими суточными перепадами температур, наличием высокой влажности и значительной концентрацией хлоридов в атмосфере.

Учитывая специфику каждой из климатических зон, ЭА наземного базирования, предназначенная для работы в тропических зонах, должна быть изготовлена в соответствующем исполнении, что отмечается в документации индексом Т. ЭА, устанавливаемая на судах с неограниченным районом плавания, имеет обозначение ОМ. ЭА, пригодная для эксплуатации на суше и на море, имеет индекс В.

Повышенные и пониженные температуры влияют на место установки ЭА, расположение источников внешнего нагрева, выделение тепла активными элементами внутри ЭА и суточным изменением температуры окружающей среды. Так как электрические параметры МС и ЭРЭ температурозависимы, необходимо, чтобы температура нагрева наиболее чувствительных к окружающей температуре элементов находилась в допустимых для этих элементов пределах. Кроме того, многие конструктивные материалы при высоких температурах претерпевают структурные изменения (тепловое старение материалов).

Работоспособность ЭА определяется *допустимым температурным диапазоном* работы, в котором ЭА должна выполнять заданные функции в рабочем, т. е. во включенном состоянии. Для исключения выхода из строя ЭА в процессе хранения и транспортирования в нерабочем, невключенном состоянии, необходимо, чтобы она выдерживала температуры, несколько

большие допустимого диапазона. Эти температуры, называемые *предельными*, характеризуют *тепло- и холодопрочность* конструкции ЭА.

Тепловой удар характеризуется резким изменением температуры окружающей среды. При этом время изменения температуры исчисляется минутами, а ее перепад — десятками градусов. Наиболее сильно тепловой удар проявляется в элементах конструкции, где имеются локальные механические напряжения, способствуя образованию микротрещин, их росту и объединению.

Влажность — один из наиболее агрессивных воздействующих факторов, проявляющий себя при погружении аппаратуры в воду, воздействии капель дождя и брызг, водяных паров, образовании росы и инея с последующим его оттаиванием. Адсорбция на поверхности элементов ЭА конденсирующейся из окружающей атмосферы воды способствует коррозии металлических деталей, старению неметаллов, изменению электроизоляционных характеристик изоляторов. Кроме того, влага может выделяться из лакокрасочных и пропиточных материалов.

Вода, содержащаяся в атмосфере, всегда загрязнена активными веществами — углекислыми и сернистыми солями кальция, магния, железа, хлористым кальцием, газами — что еще больше способствует проявлению коррозии.

Выпадение росы на поверхность аппаратуры происходит при определенной температуре (точка росы), значение которой зависит от относительной влажности атмосферы:

Относительная влажность, %	100	80	60	40	20
Точка росы, °С	15,5	12,1	7,8	2,0	–6,6

Поглощение влаги различными материалами связано с тем, что межмолекулярные промежутки в полимерах, поры в керамике и других материалах в сотни раз превосходят размеры молекул воды (около $3 \cdot 10^{-10}$ м). Способность воды смачивать поверхность и проникать в поры материалов и микротрещины в зоне спаев разнородных материалов увеличивается с повышением температуры. Так, при повышении температуры от +20 до +80 °С вязкость воды уменьшается в 3 раза, а величина поверхностного натяжения — более чем в 2 раза. Коэффициент самодиффузии при этом также увеличивается более чем в 3 раза.

Пониженное и повышенное давление окружающей среды зависит прежде всего от высоты над уровнем моря места, где эксплуатируется ЭА. На рис. 2.1 приведен график изменения атмосферного давления от высоты над уровнем моря. На границе между тропосферой и стратосферой (16 км) давление воздуха равно примерно 10 кПа. Содержание влаги в атмосфере с ростом высоты также уменьшается.

Изменение температуры с ростом высоты происходит по более сложному закону. В *тропосфере* (10 км в полярных широтах и 18 км в районе экватора) температура убывает в среднем на 6 град на каждом километре. В тропосфере сосредоточено около 80 % всей воздушной массы атмосферы. В *стратосфере* (16...55 км) температура возрастает почти до 270 К. Затем с дальнейшим ростом высоты температура снова падает *(мезосфера)*, а в *термосфере* опять возрастает и достигает 1000 К. На высоте 200 км начинается *экзосфера*, где атмосферные газы рассеиваются в мировое пространство.

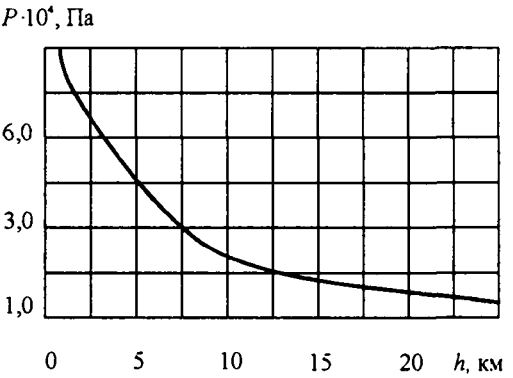


Рис. 2.1. График зависимости давления воздуха от высоты над уровнем моря

При снижении давления ухудшается отвод тепла конвективным теплообменом, уменьшается электрическая прочность воздуха, что приводит к ионизации воздуха и образованию химически активных ионов и радикалов. Повышенное атмосферное давление оказывает в первую очередь механическое воздействие на элементы конструкции ЭА.

Пыль и песок, содержащиеся в атмосфере, оседая на поверхности деталей ЭА, могут стать причиной возникновения в ней неисправностей. Пыль содержит углекислые и сернокислые соли и хлориды, которые, взаимодействуя с влагой, ускоряют процессы коррозии. Кроме того, находящаяся в воздухе пыль способствует утечке зарядов и может вызвать пробой промежутка, находящегося между контактами с высоким потенциалом. Стандартами определены три уровня концентрации пыли: 0,18; 1,0; 2,0 г/м^3.

К **активным веществам** в окружающей аппаратуру атмосфере относят сернистый газ, хлористые соли, пары кислот, щелочей и др. Их содержание в атмосфере районов, находящихся в прибрежной зоне, значительно больше, чем во внутриконтинентальных районах. Различают три типа атмосферы: атмосфера сельской местности (содержание сернистого газа не более 0,02 мг/м^3), атмосфера промышленного района (сернистый газ 0,02...2 мг/м^3, хлористые соли не более 0,3 мг/м^3), морская атмосфера (хлористые соли 2...2000 мг/м^3).

Солнечное облучение также активно воздействует на работоспособность ЭА. Спектр излучаемой солнцем энергии состоит из трех составляющих: ультрафиолетовая часть (длина волны менее $390 \cdot 10^{-10}$м), видимая часть (длина волны $390 \cdot 10^{-10}$...$760 \cdot 10^{-10}$м), инфракрасная часть (длина волны бо-

лее $760 \cdot 10^{-10}$м). На ультрафиолетовую часть спектра приходится около 9 % энергии излучения, на волны видимой части — около 41 %, на инфракрасную часть — около 50 %. Примерно 35 % солнечной энергии поглощается в космическом пространстве, 19 % поглощается атмосферой Земли, около 46 % достигает земной поверхности.

Интегральная плотность потока солнечной энергии одинакова на поверхности Земли и на высоте 15 км и составляет 1125 Вт/м^2, при этом 42 Вт/м^2 приходится на ультрафиолетовую часть спектра.

Грибковые образования (плесень) относят к низшим растениям, не имеющим фотосинтеза. В процессе своей жизнедеятельности они выделяют лимонную, уксусную, щавелевую кислоты и другие химические вещества, под действием которых изменяются характеристики многих материалов. Активно поглощая воду, эти вещества способствуют ускорению процессов коррозии, ухудшают электроизоляционные свойства полимерных материалов и т. д.

Идеальные условия для развития грибковых образований: температура 25...35 °С, относительная влажность 80...100 %, неподвижность воздуха, отсутствие света (особенно ультрафиолетовой и инфракрасной частей спектра).

Механические факторы

В процессе транспортирования и эксплуатации ЭА подвергается воздействию **вибраций**, представляющих собой сложные колебания, которые возникают при контакте конструктивных элементов с источником колебаний. Особо опасны вибрации, частота которых близка к собственным частотам колебаний узлов и элементов конструкции. Свойство аппаратуры противодействовать их влиянию характеризуется вибропрочностью и виброустойчивостью. *Виброустойчивость* определяет способность ЭА выполнять заданные функции во включенном состоянии в условиях воздействия вибраций. *Вибропрочность* характеризует качество конструкции ЭА, т. е. способность противостоять разрушающему воздействию вибрации в нерабочем состоянии и продолжать нормально работать после включения и снятия вибрационных нагрузок. Воздействующие на конструкцию ЭА вибрации характеризуются *диапазоном частот* и величиной *ускорения* (в единицах g).

Явление **удара** в конструкции ЭА возникает в случаях, когда объект, на котором установлена машина, претерпевает быстрое изменение ускорения. Удар характеризуется *ускорением, длительностью* и *числом ударных импульсов*. Различают удары одиночные и многократные.

Линейное ускорение характеризуется *ускорением* (в единицах g) и *длительностью* воздействия.

Акустический шум, проявляющийся в ЭА, устанавливаемых вблизи работающих двигателей ракет, самолетов, на кораблях, автомобильном и железнодорожном транспорте, характеризуется *давлением* звука, *мощностью* колебаний источника звука, *силой* звука, *спектром* звуковых частот.

При воздействии вибрации и ударных нагрузок на элементы конструкции ЭА в них возникают статические и динамические деформации, так как любой элемент конструкции представляет собой колебательную систему, имеющую сосредоточенную и распределенную нагрузку и определенный вид закрепления концов.

Следует отметить, что механизм влияния на конструкцию ЭА акустических шумов и ударно-вибрационных нагрузок различен. Акустический шум подвергает механическим нагрузкам практически в равной степени все элементы конструкции. Ударно-вибрационные нагрузки воздействуют на элементы конструкции ЭА через их точки крепления. Поэтому эффективность такого воздействия определяется также положением элементов относительно его направленности. Детали крепления элементов в определенной мере являются своего рода демпферами, ослабляющими действие источника вибраций. Поэтому при прочих равных условиях следует признать действие акустического шума более разрушительным, чем действие ударно-вибрационных нагрузок.

Все более расширяющиеся сферы применения ЭА практически во всех сферах человеческой деятельности ужесточают требования к устойчивости их конструкции воздействию механических факторов. Это иллюстрируется данными табл. 2.1, в которой приведена динамика роста требований нормативно-технических документов по механическим нагрузкам.

Таблица 2.1. **Уровень требований к ЭА**

Воздействия	Уровень требований			
	1960 г.	1965 г.	1970 г.	1995 г.
Вибрации:				
частота, Гц	5...60	5...1000	5...2500	5...5000
ускорение, *g*	7,5	10	15	40
Линейное ускорение, *g*	25	75	150	500
Одиночные удары, *g*	75	150	500	1000
Многократные удары, *g*	40	75	150	150
Акустические шумы, дБ	—	—	—	165

Радиационные факторы

Радиационное воздействие вызывает как немедленную, так и накапливающуюся реакцию элементов, составляющих конструкцию ЭА. Среди су-

ществующих видов излучений наибольшую опасность представляют электромагнитные излучения и частицы высоких энергий.

Полный спектр электромагнитных излучений охватывает диапазон длин волн от десятков тысяч метров до тысячных долей нанометра. Наиболее значимое воздействие на ЭА оказывают **рентгеновское излучение** и **гамма-лучи** (длина волн менее 10 нм). Эти виды излучения обладают значительной проникающей и ионизирующей способностью и характеризуются *дозой и мощностью излучения*.

Экспозиционная доза излучения, измеряемая в кулонах на килограмм (Кл/кг), представляет количество излучения, создающее посредством ионизации в одном килограмме воздуха заряд, равный одному кулону.

Мощность экспозиционной дозы характеризует интенсивность излучения и измеряется в амперах на килограмм (А/кг). Она равна экспозиционной дозе излучения в 1 Кл/кг, переданной в течение 1 с. Широкое хождение имеют внесистемные единицы измерения экспозиционной дозы, называемые Рентген, равный $2{,}58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг, и мощность экспозиционной дозы — Рентген в секунду (Р/с).

Поглощенная доза излучения, зависящая от параметров источника излучения и особенностей облучаемого вещества, измеряется отношением средней энергии, переданной излучением веществу к его массе. Единицей поглощенной дозы является Гр (Дж/кг), равный поглощенной дозе, соответствующей энергии в 1 Дж, переданной веществу массой 1 кг.

Мощность поглощенной дозы характеризует интенсивность передачи энергии излучения веществу и соответствует приращению поглощенной дозы за единицу времени (Гр/с). Допускается применение внесистемных единиц для описания поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы, называемых рад и, соответственно, рад в секунду (рад/с); 1 рад = 0,01 Гр.

Существенное воздействие на конструкцию ЭА оказывают заряженные частицы: α-частицы, протоны, β-частицы и нейтроны, обладающие высокой проникающей способностью. Для количественного описания их воздействия применяют физические величины, называемые потоком и плотностью потока частиц.

Поток ионизирующих частиц характеризуется отношением числа частиц, прошедших через данную поверхность за все время облучения, и измеряется в $с^{-1}$.

Плотность потока ионизирующих частиц определяется потоком частиц, отнесенному к площади поверхности проникновения излучения, и измеряется в $с^{-1}м^{-2}$.

Облучение частицами может вызвать в веществах обратимые, полуобратимые и необратимые явления. *Обратимые* явления возникают с началом облучения, сохраняются на протяжении его действия и исчезают с его пре-

кращением. *Полуобратимые* явления возникают с началом облучения, увеличиваются с его действием и постепенно исчезают после его прекращения. *Необратимые* явления возникают в процессе воздействия определенной дозы облучения, не исчезают и не уменьшаются после его прекращения.

Наиболее устойчивы к воздействию облучения металлы. Так, интегральный поток нейтронов величиной 10^{20} частиц/см^2 на свойства большинства металлов практически не влияет. Однако следует учитывать, что у большинства металлов при облучении снижается предел текучести в 2—3 раза, ударная вязкость уменьшается, удельное сопротивление возрастает на 20...30 %. Наименьшей радиационной стойкостью обладают магнитные материалы и электротехнические стали. Некоторые металлы, например марганец, цинк, молибден и др., после облучения нейтронами сами становятся радиоактивными.

Воздействие излучения на полимеры приводит к разрушению межмолекулярных связей, образованию зернистых структур и микротрещин. В результате полимерные детали теряют эластичность, становятся хрупкими, уменьшается их прочность на разрыв.

При облучении резисторов возникают обратимые и необратимые изменения сопротивления, уровень шума увеличивается, параметр влагостойкости уменьшается. Керамические и проволочные резисторы наиболее устойчивы к действию облучения. Интегральный поток величиной до 10^{20} частиц/см^2 почти не вызывает изменений их параметров. Менее устойчивы к облучению металлопленочные и пленочные углеродистые резисторы. Их параметры заметно ухудшаются при интегральном потоке свыше 10^{14} частиц/см^2. Так же чувствительны к облучению и композиционные резисторы.

Облучение конденсаторов ухудшает их электрическую прочность, изменяет емкость и тангенс угла диэлектрических потерь. Причиной этого являются необратимые явления в структуре диэлектрика, механические деформации, ионизация диэлектрика и воздушных промежутков. Наиболее стойкими к облучению являются керамические, стеклоэмалевые и слюдяные конденсаторы. Конденсаторы с органическим диэлектриком (бумажные, полистироловые, лавсановые, фторопластовые и др.) обладают пониженной радиационной стойкостью. Электролитические конденсаторы обладают наиболее низкой стойкостью, в них разгерметизация и разложение электролита наступают при низких дозах облучения.

По сравнению с другими типами электрорадиоэлементов наименее стойкими к облучению являются полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы вследствие возникновения в них обратимых и необратимых явлений. Необратимые дефекты в полупроводниках приводят к потере выпрямительных свойств диодов из-за постепенного увеличения удельного электросопротивления исходного материала. Транзисторы всех типов при облучении теряют усилительные свойства, в них возрастают токи утечки,

пробивное напряжение снижается. Их радиационная стойкость составляет $10^{12}...10^{14}$ нейтронов/см^2 при облучении нейтронами и $10^4...10^7$ рад при гамма-облучении.

В интегральных микросхемах (МС) при облучении существенно изменяются характеристики вследствие изменения параметров входящих в них резисторов, конденсаторов, диодов, транзисторов. Так же изменяются изолирующие свойства разделительных *p-n*-переходов, возрастают токи утечки, появляются многочисленные паразитные связи между элементами структуры микросхем, что в результате приводит к нарушению их функционирования.

2.2. Объекты установки ЭА и их характеристики

Характер и интенсивность воздействия климатических, механических и радиационных факторов зависят от тактики использования и объекта, на котором эксплуатируется ЭА. По виду объекта установки ЭА можно разделить на три большие группы: стационарные, транспортируемые и портативные (рис. 2.2). Государственные сандарты классифицируют ЭА в зависимо-

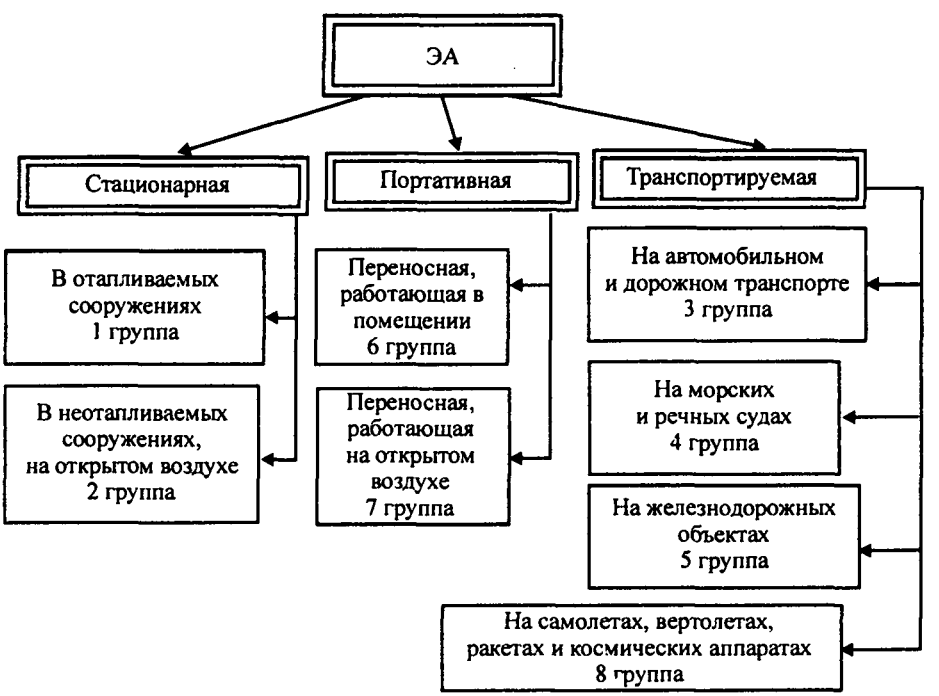


Рис. 2.2. Классификация ЭА по объектам установки

сти от условий эксплуатации и вида объекта установки на стационарные, портативные и транспортируемые, а также на группы, разновидности и номера которых также приведены на рис. 2.2.

Стационарная ЭА — это аппаратура, эксплуатируемая в отапливаемых и неотапливаемых помещениях, бункерах, подвалах, помещениях с повышенной влажностью, на открытом воздухе, в производственных цехах (ЭА 1- и 2-й групп). Условия эксплуатации и транспортирования такой аппаратуры характеризуются весьма широким диапазоном рабочих (–50...+50 °С) и предельных (–50...+65 °С) температур, влажностью до 90...98 %, вибрацией до 120 Гц при 4...6 *g*, наличием многократных (до 5 *g*) и одиночных (до 75 *g*) ударов, воздействием дождя до 3 мм/мин и соляного тумана с дисперсностью капель до 10 мкм и содержанием воды до 3 г/м^3.

Транспортируемая ЭА — это аппаратура, устанавливаемая и эксплуатируемая на автомобилях и автоприцепах, железнодорожном и гусеничном транспорте, на судах различных классов (ЭА 3-, 4- и 5-й групп), на борту самолетов, ракет, космических аппаратов искусственных спутников Земли (бортовая ЭА — 8-я группа). Специфика работы этого вида аппаратуры предопределяет повышенное воздействие механических факторов. Каждый вид транспорта имеет собственные вибрационные характеристики, приведенные на рис. 2.3. Для предупреждения повреждения такой ЭА необходимо, чтобы вся она и отдельные ее части имели собственные частоты колебаний вне диапазона частот вибрации того транспортного средства, на котором машина эксплуатируется или перевозится.

На ЭА, установленную на *автомобильном транспорте*, могут воздействовать вибрация частотой до 200 Гц и удары, вызванные неровной дорогой. При движении *железнодорожного транспорта* возможны внезапные толчки, как следствие изменения скорости движения (при маневрировании возникают удары с ускорением до 40 *g*). Биение колес о стыки рельсов вызывают вибрацию с частотой до 400 Гц при ускорении до 2 *g*. Особо жестким воздействиям подвергается конструкция ЭА, эксплуатируемая на *гусеничном транспорте* (танках, транспортерах, самоходной артиллерии, тракторах). Здесь вследствие «стука» гусениц частота вибраций может доходить до 7000 Гц с амплитудой ±0,025 мм. Удары, вызванные неровной дорогой, отдачей орудия при выстреле, попаданием снаряда в корпус, могут быть большой силы и сопровождаться вибрацией. Кроме того, постоянно воздействие акустического шума с уровнем до 150 дБ.

Если ЭА установлена непосредственно на *орудийной площадке*, то наибольшую опасность для нее представляет ударная волна — главная причина толчков и вибраций. Величина сообщаемых ударной волной вибраций и ударов зависит от массы и поверхности корпуса ЭА. Чем больше масса и поверхность корпуса ЭА, тем эффект действия ударной волны меньше.

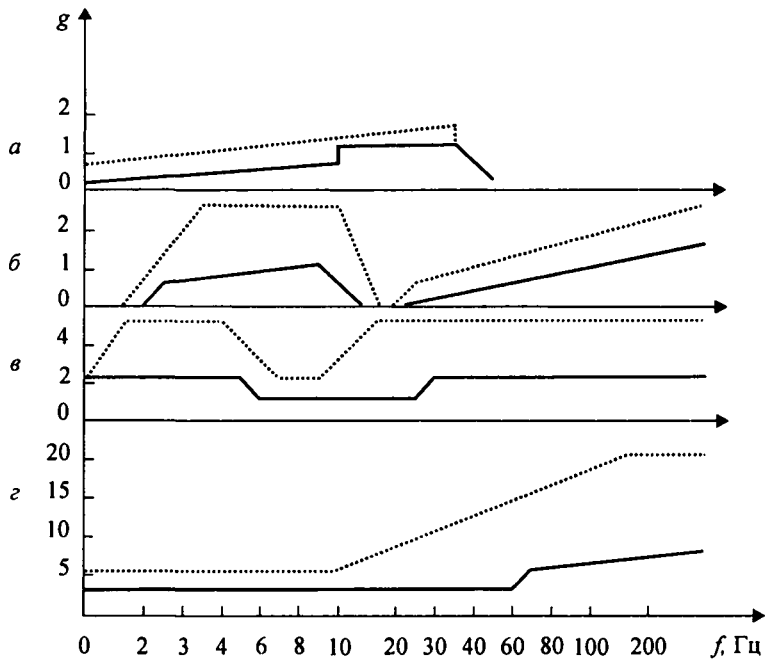


Рис. 2.3. Вибрационные характеристики различных видов транспорта: морского (*а*), железнодорожного (*б*), автомобильного (*в*), авиационного (*г*): ———— — область постоянных значений; · · · · · · · · — область случайных значений

ЭА в *морском исполнении* устанавливаются на больших сравнительно тихоходных кораблях, малых быстроходных судах, подводных лодках, а также орудийных площадках береговой артиллерии. Характерными условиями работы таких машин является наличие вибраций, ударных нагрузок и агрессивной (морской) атмосферы.

Вибрация на судне вызывается работой винтов, гребного вала, главного и вспомогательного двигателей и гидродинамическими силами, возникающими при движении судна по неспокойному морю. Диапазон частот вибраций на кораблях сравнительно невелик и обычно не превышает 25 Гц. Амплитуда вибраций также невелика, величина ее зависит от места расположения. Так, на крейсере наибольший уровень вибраций приходится на кормовую часть: частота 0...25 Гц с амплитудой до 25 мм. На более мелких судах, например на сторожевом корабле, больший уровень вибраций характерен для носовой части: частота до 1000 Гц с амплитудой до 1 мм.

Морской воздух, окружающий ЭА, установленную на корабле, содержит много различных активных веществ, постоянно влияющих на ее рабо-

тоспособность. Поэтому ЭА этого класса должны обладать высокой коррозионной стойкостью, плеснестойкостью, водо- и брызгозащищенностью.

Бортовая ЭА устанавливается на самолетах, вертолетах и ракетах различного класса, управляемых снарядах, искусственных спутниках Земли (ИСЗ) и космических аппаратах. На самолетах электронная аппаратура находится, как правило, в фюзеляже. При этом на нее воздействуют вибрационные нагрузки частотой до 500 Гц с амплитудой до 10 мм и акустический шум, уровень которого достигает 150 дБ при частоте 50...10000 Гц.

Аппаратура, устанавливаемая на борту ракет различных классов и назначения, находится в наиболее неблагоприятных условиях с точки зрения воздействия вибраций, ударов и ускорений. Вибрации ракет в полете носят очень сложный характер, определяемый совместным воздействием работающего ракетного двигателя и аэродинамических эффектов. Характер вибраций обычно беспорядочный, и поэтому она охватывает широкий диапазон частот. Например, мощные ракетные двигатели, работающие на жидком топливе, имеют частотный диапазон вибраций в несколько сотен герц. С уменьшением мощности двигателя частота вибраций увеличивается и может доходить до нескольких тысяч герц. Поэтому на вычислительную аппаратуру, установленную, например, на борту ИСЗ, при доставке на орбиту воздействие вибраций происходит на всем диапазоне частот.

Наибольшее воздействие на ЭА оказывают вибрации двигателей малых ракет на твердом топливе, а также больших двигателей на жидком топливе. Частота вибраций составляет 2500 Гц при ускорениях до 20 *g*. Характер таких вибраций синусоидальный. В момент запуска ракеты и при ее полете на бортовую аппаратуру воздействует акустический шум, уровень которого достигает 150 дБ. Акустический шум малых ракет максимален в момент старта.

Ускорение, развиваемое двигателем больших ракет на жидком топливе, обычно не превышает 15 *g*. Максимальное ускорение ракет, находящихся на управляемой орбите, не превышает 10 *g*, а малых ракет на твердом топливе — 50 *g*. Атмосферное давление в негерметизированной аппаратуре в процессе движения ракеты изменяется от нормального до практически нулевого значения. Большим изменениям подвергаются окружающая температура, содержание влаги и вредных веществ в атмосфере.

Портативная ЭА (6- и 7-я группы) включает микрокалькуляторы, ЭВМ типа «ноут-бук», специализированные вычислители, находящиеся в распоряжении геолога, топографа, строителя, солдата и офицера армии и др. Сюда же можно отнести переносную радиоприемную и радиопередающую аппаратуру, небольшую медицинскую технику и т. д. Небольшие габариты, малая мощность потребления, высокая надежность и сравнительно небольшая стоимость делают этот класс аппаратуры незаменимым для проведения расчетов, не требующих сложного программирования, осуществления экспериментов и исследований и т. д.

Условия работы портативной ЭА должны соответствовать зоне комфорта человека, которая характеризуется температурой окружающей среды 18...24 °С, уровнем акустического шума 70...85 дБ, влажностью 20...90 % и высотой над уровнем моря до 3000 м. Если температура становится меньше –17 °С или выше +43,5 °С, уровень шума достигает 120 дБ, влажность составляет меньше 1 %, а высота над уровнем моря больше 6000 м, то считается, что такие условия превышают физиологические возможности человека, и он может в них существовать единицы или десятки минут.

Физические возможности человека ограничивают максимально допустимой массой переносимой им аппаратуры. С этой точки зрения портативная аппаратура делится на легкую (до 29 Н для мужчин и до 16 Н для женщин), среднюю (соответственно до 147 Н и 80 Н) и тяжелую (до 390 Н и до 216 Н).

На портативную аппаратуру может воздействовать вибрация частотой до 20 Гц с ускорением до 2 *g* и удары до 10 *g* при длительности 5...10 мс.

Различают и другие виды ЭА, эксплуатируемые, например, в условиях химического производства, в составе системы управления артиллерийского снаряда и др. Для них характерны сверхбольшие значения одного—трех внешних факторов, на устойчивость к которым и проектируется конструкция такой ЭА. Так, для работы в условиях химического производства главным является устойчивость к агрессивной среде, а для артиллерийского снаряда — удар, ускорение и температура окружающей среды.

2.3. Требования, предъявляемые к конструкции ЭА

Вновь разрабатываемая ЭА должна отвечать тактико-техническим, конструктивно-технологическим, эксплуатационным, надежностным и экономическим требованиям. Все эти требования взаимосвязаны, и оптимальное их удовлетворение представляет собой сложную инженерную задачу. Кроме того, эти требования должны отвечать рекомендациям соответствующих государственных стандартов. Например, для средств вычислительной техники действуют следующие стандарты.

- Средства вычислительной техники. Общие технические требования, правила приемки, методы испытаний, маркировка, упаковка и хранение.
- Машины вычислительные, электронные цифровые общего назначения. Общие технические требования.
- Средства технические малых электронных вычислительных машин. Общие технические требования.
- Машины вычислительные электронные персональные. Типы, основные параметры. Общие технические требования.

И другие.

Все эти требования содержатся в ТЗ на разрабатываемую ЭА.

Тактико-технические требования включают, в первую очередь, требования к параметром ЭА, характеризующим ее потребительские качества (для ЭВМ — это быстродействие, объем оперативной, постоянной и внешней памяти, разрядность команд и данных, языки программирования и др.). Эти требования в основном удовлетворяются на ранних стадиях разработки ЭА, когда определяется состав аппаратуры, ее структура, требования к отдельным устройствам и т. д. Учитывая необходимость работы будущей ЭА в составе управляемой ею системы, необходимо предусмотреть их техническую, программную, информационную и эксплуатационную *совместимость*.

В конструкции ЭА должны быть предусмотрены меры защиты от воздействия климатических и механических факторов, состав и значения которых приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. **Значения воздействующих факторов на группы ЭА**

Внешние факторы	Группа ЭА (рис. 2.2)						
	1	2	3	4	5	6/7	8
Климатические							
Пониженная температура, °С							
предельная 1 степень	–40	–40	–40	–40	–40	5/–40	–60
2 степень	–50	–50	–50	–50	–50	5/–50	–60
рабочая 1 степень	5	–10	–25	–10	–25	5/–10	–40
2 степень	5	–25	–40	–10	–40	5/–25	–50
Повышенная температура, °С							
предельная	55	60	60	60	60	50/60	75
рабочая	40	50	50	50	50	40/50	60
Относительная влажность, %							
при температуре, °С	86	93	93	93	93	80/93	98
1 степень	25	25	25	25	25	25	25
2 степень	25	40	40	40	40	40	25
время выдержки, ч	48	72	72	72	72	36/72	48
Интенсивность дождя,							
мм/мин	—	3	3	3	3	–/3	3
время выдержки, ч	—	0,33	0,33	0,33	0,33	–/0,33	0,33
Пониженное давление, Па	$6{,}1\cdot10^4$	$6{,}1\cdot10^4$	$6{,}1\cdot10^4$	$6{,}1\cdot10^4$	$6{,}1\cdot10^4$	$6{,}1\cdot10^4$	$6{,}1\cdot10^4$
время выдержки, ч	2...6	2...6	2...6	2...6	2...6	2...6	2...6
Глубина погружения							
в воду, м	—	—	—	—	—	—	—
время выдержки, ч	—	—	—	—	—	—	—
Поток пыли:							
скорость потока, м/с	—	10	10	—	10	–/10	—
время выдержки, ч	—	1	1	—	1	–/1	—

Окончание табл. 2.2

Внешние факторы	Группа ЭА (рис. 2.2)						
	1	2	3	4	5	6/7	7
Морской туман:							
температура, °С	27	27	27	27	27	–/27	27
содержание воды, г/м^3	2...3	2...3	2...3	2...3	2...3	–/2...3	2...3
время выдержки, ч	24	48	48	48	48	–/48	48
Механические							
Вибрация на одной частоте:							
частота, Гц	20	20	20	20	20	20	20
ускорение, g	2	2	2	2	2	2	2
время выдержки, ч	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Вибрация в диапазоне частот:							
частота, Гц	—	—	1...200	1...200	1...300	—	До 2500
ускорение, g	—	—	10	5	2	—	1..13
время выдержки, ч	—	—	12	4	12	—	12
Одиночные удары:							
длительность, мс	—	—	15...75	До 500	15...40	—	15...150
число ударов в 1 мин	—	—	15	15	15	—	15
общее число ударов	—	—	60	60	60	—	60
Удары многократные:							
длительность, мс	—	—	5...10	5...15	5...15	—	2...10
число ударов в 1 мин	—	—	40...80	40...80	40...80	—	40...80
ускорение, g	—	—	15	15	25	—	5...15
общее число ударов	—	—	12000	12000	12000	—	6000
Линейная перегрузка, g	—	—	—	—	—	—	10...80

К **конструктивно-технологическим требованиям** относятся: обеспечение функционально-узлового принципа построения конструкции ЭА, технологичность, минимальная номенклатура комплектующих изделий, ремонтопригодность, защита от несанкционированного доступа, удобный доступ к узлам и элементам, обеспечение безопасной работы оператора.

Функционально-узловой принцип конструирования, применяющийся в ЭА третьего и последующего поколений, заключается в разбиении принципиальной схемы аппаратуры на такие функционально законченные узлы, которые могут быть выполнены в виде идентичных конструктивно-технологических единиц. Применение этого принципа конструирования позволяет автоматизировать процессы изготовления и контроля конструктивных единиц, упростить их сборку и наладку, организовать их производство на разных предприятиях.

Понятие *технологичность* включает правила и положения, определяемые возможностями предприятия-изготовителя ЭА и влияющих на эффективность ее производства и эксплуатации. Аппаратура, технологичная для одного предприятия, может оказаться нетехнологичной для другого. Причинами этого могут быть: неравномерный уровень развития предприятий, их различие в технической оснащенности, уровне и культуре производства.

Понятие технологичности тесно связано с понятием *экономичности* конструкции ЭА. Наиболее технологичные конструкции, как правило, и наиболее экономичны в условиях производства. Технологичность конструкции ЭА в существенной степени определяется рациональным выбором ее структуры, которая должна разрабатываться с учетом автономного, раздельного изготовления и наладки ее основных элементов, узлов, блоков. Конструкция ЭА более технологична, чем меньше регулировочных и доводочных операций приходится выполнять после ее окончательной сборки. В этом плане идеальная технологичность у ЭА, которая, будучи собранной из отдельных узлов, выполняет заданные функции сразу же после включения электропитания.

В технологичной конструкции должны максимально использоваться унифицированные, нормализованные и стандартные детали и материалы. Необходимость разработки новых материалов с улучшенными свойствами или новых технологических процессов должна быть технически и экономически обоснована. В технологичной конструкции максимально используют взаимозаменяемость, регулируемость, контролепригодность, инструментальная доступность узлов и элементов.

К **эксплуатационным** требованиям относят простоту управления и обслуживания, предусмотрение различных мер сигнализации опасных режимов работы (выход из строя, обрыв заземления, открывание дверей шкафов и т. д.), наличие в комплекте ЭА аппаратуры и инструментов, обеспечивающих профилактический контроль и наладку конструктивных элементов.

С эксплуатационными требованиями тесно связаны требования обеспечения нормальной работы оператора: организация его рабочего места, возможность подхода ко всем устройствам ЭА, безопасная работа при отладке и ремонте. Важна также такая организация пульта управления ЭА и расположение клавиш на нем, клавиатуре и дисплея (для персональных машин), которая бы отвечала современным эргономическим требованиям и требованиям инженерной психологии. Внешний вид ЭА должен быть эстетичным, а органы управления должны быть удобными, доступными и не вызывать напряжения органов чувств у оператора.

Требования по надежности включают конкретные количественные характеристики: вероятность безотказной работы за определенный отрезок

времени, среднюю наработку на отказ, среднюю наработку на сбой, среднее время восстановления работоспособности, срок службы, коэффициент технического использования, средний срок сохраняемости, коэффициент готовности.

К **экономическим требованиям** относят минимально возможные затраты времени, труда и материальных средств на разработку, изготовление и эксплуатацию ЭА; минимальную стоимость ЭА после освоения ее в производстве; минимальные затраты на эксплуатацию, обслуживание и плановые ремонты.

В заключение приведем некоторые из характеристик, которыми должна обладать, например, электронно-вычислительная аппаратура в соответствии с рекомендациями, изложенными в приведенных в начале этого параграфа государственных стандартах.

Для ЭВМ общего назначения предусмотрено 6 классов производительности до $20 \cdot 10^6$ и более коротких операций в секунду с минимальной емкостью оперативной памяти не менее 4 Мбайт. Для персональных ЭВМ предусмотрено 5 типов исполнения с разрядностью от 8 до 32, производительностью не менее $4 \cdot 10^6$ коротких операций в секунду, емкостью ОЗУ не менее 8 Мбайт.

ЭВМ общего назначения должны отвечать следующим показателям надежности. Средняя наработка на отказ в зависимости от класса машины должна составлять 500—2000 ч. Среднее время восстановления работоспособности выбирается из ряда: 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 ч. Средний срок службы с учетом восстановительных работ должен быть не менее 10 лет. Коэффициент технического использования должен быть не менее 0,95 из расчета круглосуточной работы в течение одного года. Средний срок сохраняемости до ввода в эксплуатацию установлен не менее 9 месяцев. Коэффициент готовности должен быть не менее 0,98.

Для персональных ЭВМ средняя наработка на отказ должна быть не менее 15000 ч, среднее время восстановления работоспособности не должно превышать 0,25 ч, а время готовности не должно превышать 2 мин.

Средняя наработка на отказ микрокалькуляторов установлена не менее 20000 ч, срок службы не менее 10 лет, а время готовности не более 30 с.

Контрольные вопросы

1. Какие факторы входят в группу механических воздействий?
2. Какие факторы входят в группу климатических воздействий?
3. Какие факторы входят в группу радиационных воздействий?
4. Как влияет невесомость на зафиксированные на земле узлы ЭА?

5. Как влияют радиационные факторы на механические свойства конструкционных материалов?
6. Какие внешние воздействия характерны для аппаратуры, установленной на орудийных площадках береговой артиллерии?
7. Что подразумевает понятие «технологичность»?
8. Какие эргономические и эстетические требования предъявляются к конструкции микрокалькуляторов?
9. Каким требованиям должна отвечать конструкция встраиваемой ЭА?

3. КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ, УЗЛОВ И УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

3.1. Модульный принцип конструирования, конструктивная иерархия элементов, узлов и устройств

Снизить затраты на разработку, изготовление и освоение производства ЭА, обеспечить совместимость и преемственность аппаратурных решений при одновременном улучшении качества, увеличении надежности и срока службы позволяет использование *модульного принципа конструирования*.

Под *модульным принципом конструирования* понимается проектирование изделий ЭА на основе конструктивной и функциональной взаимозаменяемости составных частей конструкции — *модулей*.

Модуль — составная часть аппаратуры, выполняющая в конструкции подчиненные функции, имеющая законченное функциональное и конструктивное оформление и снабженная элементами коммутации и механического соединения с подобными модулями и с модулями низшего уровня в изделии.

Модульный принцип конструирования предполагает *разукрупнение (разбивку, расчленение)* электронной схемы ЭА на функционально законченные подсхемы (части), выполняющие определенные функции. Эти подсхемы чаще всего разбиваются на более простые и так до тех пор, пока электронная схема изделия не будет представлена в виде набора модулей разной сложности, а низшим модулем не окажется корпус МС. Модули одного уровня объединяются между собой в ЭА на какой-либо конструктивной основе (несущей конструкции).

Возможен и другой подход к проектированию, когда частям детально разработанной функциональной схемы изделия ставятся в соответствие схемы выбранной серии *микросхем*, а электрическая схема изделия как бы «покрывается» электрическими схемами микросхем. При этом отдельные

части схемы изделия могут оказаться непокрытыми микросхемами существующих серий, тогда такие подсхемы реализуются дискретными *электрорадиоэлементами* (ЭРЭ). В результате будет получен набор корпусов МС и ЭРЭ, реализующий схему изделия. Эти корпуса и ЭРЭ устанавливаются и коммутируются между собой в модулях следующего уровня иерархии, которые устанавливаются и коммутируются в модуле более высокого уровня, и т. д. В зависимости от сложности проектируемого изделия будет задействовано разное число уровней модульности (уровней конструктивной иерархии).

Конструкция современной ЭА представляет собой некоторую *иерархию* модулей (порядок в расположении модулей от низшего к высшему), каждая ступень которой называется *уровнем модульности*. При выборе числа уровней модульности проводится *типизация* модулей, т. е. сокращение их разнообразия и установление таких конструкций, которые выполняли бы самые широкие функции в изделиях определенного функционального назначения. Функциональное многообразие изделий достигается использованием различного числа уровней модульности с возможностью конструктивного оформления высшего и, следовательно, самого сложного модуля в виде законченного изделия.

Выделяют четыре основных и два дополнительных *уровня модульности*. Под *основными* понимаются уровни модульности, широко применяемые в разнообразной аппаратуре, под *дополнительными* — используемые в специальной аппаратуре, но не всегда. Иерархия модулей и их входимость (установка) приведены на рис. 3.1, где модули разных уровней отделены двойными вертикальными линиями.

Модулем *нулевого уровня* является *электронный компонент*. В зависимости от исполнения аппаратуры модулем нулевого уровня служат ЭРЭ и МС.

Модуль *первого уровня* — *типовой элемент замены* (ТЭЗ) — представляет собой ПП с установленными на ней модулями нулевого уровня и электрическим соединителем.

Модуль *второго уровня* — *блок*, основными конструктивными элементами которого является *панель* с ответными *соединителями* модулей первого уровня. Межблочная коммутация выполняется соединителями, расположенными по периферии панели блока. Модули первого уровня размещаются в один или несколько рядов. На рис. 3.1 показан однорядный блок.

Модуль *третьего уровня* — *стойка*, в которой устанавливаются блоки или 2—3 рамы.

Модулем *уровня 0,5* является микросборка, состоящая из подложки с размещенными на ней безкорпусными микросхемами. Межмодульная ком-

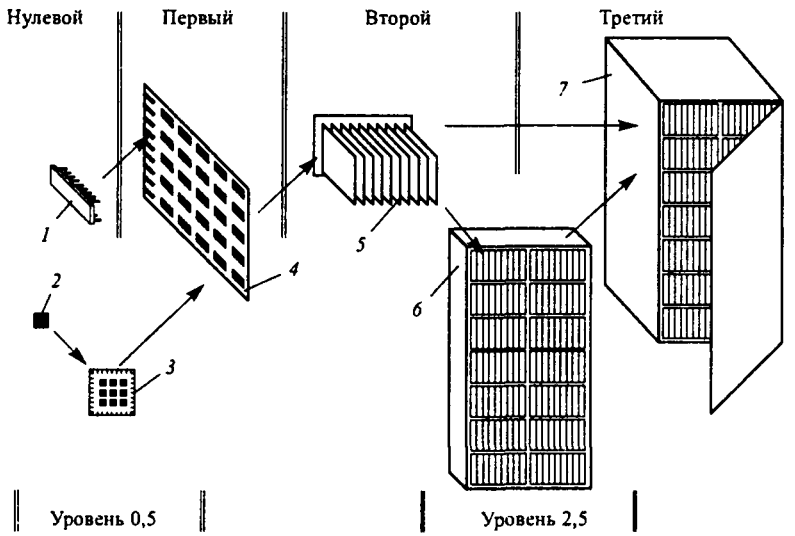


Рис. 3.1. Конструктивная иерархия и входимость модулей:

1 — микросхема; *2* — бескорпусная микросхема; *3* — микросборка; *4* — типовой элемент замены (ТЭЗ), ячейка; *5* — блок; *6* — рама; *7* — стойка

мутация обеспечивается введением по периферии подложки контактных площадок. Модуль вводится для увеличения плотности компоновки аппаратуры.

Модуль *уровня 2,5* представляет собой раму, в которой размещаются 6—8 блоков. Рама применяется в стоечной аппаратуре, использующей небольшие по размерам модули первого уровня.

Модульный принцип конструирования предусматривает несколько уровней коммутации:

1-й уровень — коммутация печатным и (или) проводным монтажом электронных компонентов на плате;

2-й уровень — коммутация печатным или объемным монтажом ответных соединителей модулей первого уровня в блоке;

3-й уровень — электрическое объединение блоков или рам в стойке и стоек между собой жгутами и кабелями;

уровень 0,5 — электрическое соединение выводов бескорпусных микросхем пленочными проводниками;

уровень 2,5 — коммутация блоков в раме проводами, жгутами или кабелями.

При разработке несложной аппаратуры высшие уровни модульности отсутствуют. Полная модульность, приведенная на рис. 3.1, используется только в сложной аппаратуре, например в супер-ЭВМ.

Выражение *функционально-узловой метод* проектирования широко распространено в отечественной литературе. Этот метод дает подход к разбивке функциональной схемы изделия на узлы (подсхемы), конструктивно выполненные на ПП модулями первого уровня. В действительности задача проектирования ставится шире, так как сложная аппаратура воплощает не одну схему, а, как правило, несколько структурных или функциональных схем. Поэтому целесообразно говорить о *модульном принципе проектирования*, подразумевая под этим принципы выделения (разукрупнения, разбивки) схем на функциональные группы разных уровней сложности (узлы, устройства, комплексы, системы) для реализации их конструктивными модулями.

Конструктивным модулям можно поставить в соответствие схемные модули, которые так же имеют многоуровневую иерархию и представляют собой функциональные узлы, устройства, комплексы, системы (табл. 3.1.).

Таблица 3.1. **Связь между конструктивной и схемной модульностью**

Конструктивная модульность	Схемная модульность
Корпус микросхемы	Логический, запоминающий элемент
ТЭЗ	Функциональный узел
Блок	Устройство
Рама	Комплекс
Стойка	Система

Необходимо отметить, что приведенная в табл. 3.1 связь конструктивной и схемной модульности условна. Она имеет отношение к аппаратуре, реализуемой на микросхемах малой степени интеграции, и в общем случае зависит от функциональной сложности проектируемого изделия и степени интеграции применяемых МС. Дело в том, что в больших интегральных схемах (БИС) реализуются целиком устройства (например, преобразователи, запоминающие устройства) или их крупные фрагменты. Весьма возможно, что несложная система будет конструктивно выполнена на одной печатной плате.

При разбивке структурных и функциональных схем необходимо удовлетворить многим и порой противоречивым требованиям:

- функциональной законченности, когда выделяемая подсхема должна обладать необходимой полнотой и выполнять частные функции по приему, обработке, хранению и передаче информации;
- минимизации внешних связей подсхем, либо, если электрические соединители модулей выбраны (заданы), чтобы число внешних связей не превысило число контактов соединителя;
- максимального заполнения отводимого конструктивного пространства (поверхности) модулями (компонентами) (по этой же причине компо-

ненты не должны существенно отличаться между собой по габаритным размерам и массе);

• модули (компоненты) подсхем должны рассеивать приблизительно одинаковые мощности во избежание местных перегревов;

• модули (компоненты) подсхем не должны быть чрезмерно чувствительными к электрическим, магнитным и электромагнитным помехам и не должны создавать чрезмерных помех.

Соблюдение требований функциональной законченности покажем на примере разработки конструкции супергетеродинного приемника, состоящего из следующих подсхем: входной цепи, усилителя радиочастоты, преобразователя частоты, усилителя промежуточной частоты, детектора, усилителя звуковой частоты. При реализации конструкции радиоприемника каждый функциональный узел можно выполнить на отдельной плате и в то же время всю схему радиоприемника — на одной плате. В том и другом случае функциональная законченность будет иметь место, но во втором случае общее число внешних связей меньше, и надежность, если все прочие элементы схемы и конструкции одинаковы, окажется выше. Функциональная законченность будет отсутствовать, если на одной плате выполнена схема входной цепи и часть усилителя радиочастоты, а на другой плате — оставшаяся часть усилителя радиочастоты и преобразователь частоты. Функциональная законченность подсхем сокращает число межмодульных электрических соединений, позволяет вносить конструктивные изменения на более поздних стадиях проектирования, упрощает и удешевляет контроль модулей.

Модули высших уровней поставляются разработчикам ЭА в виде *базовых несущих конструкций* (БНК), которые представляют собой деталь или совокупность деталей, предназначенных для размещения, монтажа составных частей аппаратуры и обеспечения устойчивости ЭА в условиях внешних воздействий. Под БНК понимается стандартная несущая конструкция, служащая для разработки разнообразной ЭА определенного назначения.

3.2. Стандартизация при модульном конструировании

Ускорение разработки и производства аппаратуры, увеличение ее серийности, снижение стоимости можно достигнуть унификацией, нормализацией и стандартизацией основных параметров и типоразмеров печатных плат, блоков, приборных корпусов, стоек, широким применением модульного принципа конструирования.

В основе стандартизации модулей и их несущих конструкций лежат типовые функции, свойственные многим электронным системам. Для использо-

вания при проектировании модульного принципа конструирования разработаны ведомственные нормали и государственные стандарты, устанавливающие термины, определения, системы типовых конструкций модульных систем.

Конструкционная система прежде всего должна представлять многоуровневое семейство модулей с оптимальным составом набора, обеспечивающим функциональную полноту при построении аппаратуры определенного назначения. Все модули системы должны быть совместимы между собой по конструктивным, электрическим и эксплуатационным параметрам.

Базовым называется принцип конструирования, при котором частные конструктивные решения реализуются на основе стандартных конструкций модулей или конструкционных систем модулей (базовых конструкций), разрешенных к применению в аппаратуре определенного класса, назначения и объектов установки.

При разработке базовых конструкций должны учитываться особенности современных и, что более важно, будущих разработок. При этом частные конструктивные решения обобщаются, а основные свойства и параметры закладываются в конструкции, которые стандартизуются, поставляются и рекомендуются для широкого применения.

Базовые конструкции не должны быть полностью конструктивно завершенными, необходимо предусматривать возможность их изменения (в основном косметического характера) для создания модификаций аппаратурных решений. Иерархическое построение базовых конструкций с гибкой структурой и числом уровней не более четырех является вполне достаточным для разработки ЭА любой сложности.

При стандартизации параметры конструкций объединяются в *параметрические ряды*, характеризующиеся совокупностью числовых значений на основе принятых градаций и диапазонов. Если в качестве параметров ряда используют геометрические размеры конструкции, то говорят не о параметрических, а о *размерных рядах*. Оба вида рядов получили широкое распространение.

Оптимальными с позиций стандартизации следует считать ряды, обеспечивающие наибольший экономический эффект от их использования и *опережающую стандартизацию*, т. е. сокращение объема работ, связанных с пересмотром стандартов и их модернизацией (опережающая стандартизация позволяет увеличить сроки действия стандартов).

3.3. Модули нулевого уровня

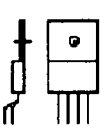
На низшем нулевом уровне конструктивной иерархии ЭА находятся МС. Корпуса МС служат для защиты помещенных в них полупроводнико-

вых кристаллов, подложек и электрических соединений от внешних воздействий, а также для удобства при сборке и монтаже модулей первого уровня. Кристаллы или подложки МС приклеивают или припаивают к основанию корпуса, а выходные контакты подсоединяют к выводам корпуса пайкой или сваркой.

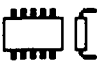
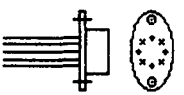
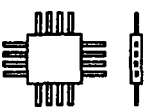
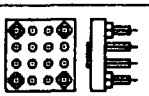
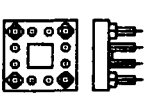
Корпуса микросхем бывают металлостеклянными, металлокерамическими, металлопластмассовыми, стеклянными, керамическими и пластмассовыми. В первых трех разновидностях корпусов крышка выполняется металлической, а основание — стеклянным, керамическим или пластмассовым. Металлическая крышка обеспечивает эффективную влагозащиту при хорошем отводе теплоты от кристалла, снижает уровень помех.

В пластмассовых и керамических корпусах крышку и основание выполняют из однородного материала. Основание корпуса соединяют с крышкой пайкой, сваркой или склеиванием. Некоторые корпуса получают путем заливки формы корпуса пластмассой. На корпус МС наносится маркировка в соответствии с ее условным обозначением и выполняется нумерация выводов относительно *ключа* или *метки*. По форме проекции тела корпуса на установочную плоскость и расположению выводов корпуса делят на типы и подтипы (табл. 3.2).

Таблица 3.2. **Типы и подтипы корпусов микросхем**

Тип	Подтип	Расположение выводов относительно установочной плоскости	Внешний вид корпуса	Форма проекции тела корпуса на установочную плоскость
1	11	Перпендикулярное в один ряд		Прямоугольная
	12	Перпендикулярное в два ряда		
	13	Перпендикулярное в три ряда		
	14	Перпендикулярное по контуру прямоугольника		
	15	Перпендикулярное, в один ряд или отформованные в два ряда		

Окончание табл. 3.2

Тип	Подтип	Расположение выводов относительно установочной плоскости	Внешний вид корпуса	Форма проекции тела корпуса на установочную плоскость
2	21	Перпендикулярное в два ряда		Прямоугольная
	22	Перпендикулярное в четыре ряда в шахматном порядке		
3	31	Перпендикулярное по окружности		Круглая
	32	Перпендикулярное по окружности		Овальная
4	41	Параллельное по двум противоположным сторонам		Прямоугольная
	42	Параллельное по четырем сторонам		
	43	Параллельное, отформованное по двум сторонам		
	44	Параллельное, отформованное по четырем сторонам		
	45	Параллельное, отформованное под корпус по четырем сторонам		
5	51	Перпендикулярное для боковых площадок выводов по четырем сторонам		Прямоугольная
	52	Перпендикулярное для боковых площадок выводов по двум сторонам		Квадратная
6	61	Перпендикулярное в несколько рядов		Квадратная
	62	Перпендикулярное в несколько рядов со стороны крышки корпуса		

Для правильной установки МС на плату корпуса́ имеют ориентир (ключ), расположенный в зоне первого вывода (выводы нумеруются слева направо или по часовой стрелке со стороны расположения выводов). Ключ делается визуальным в виде металлизированной метки, выемки или паза в корпусе, выступа на выводе и пр. В поперечном сечении выводы корпусов имеют круглую, квадратную или прямоугольную форму. Шаг между выводами составляет 0,625; 1,0; 1,25; 1,7 и 2,5 мм.

Типы корпусов микросхем подразделяются на типоразмеры, каждому из которых присваивается шифр, обозначающий тип корпуса и двузначное число порядкового номера типоразмера. Затем через точку указывается количество выводов корпуса. Например, корпус с 48 выводами и условным обозначением 4113.48—1 соответствует корпусу четвертого типа, 41-му подтипу с порядковым номером 13. Последняя цифра условного обозначения — порядковый регистрационный номер. Для МС в экспортном исполнении вместо регистрационного номера вводится латинская буква *Е*.

Каждый тип корпуса имеет достоинства и недостатки. Корпус с *планарными выводами* для установки и монтажа требует на печатной плате почти вдвое больше площади, чем тех же размеров корпус, но с ортогональным расположением выводов. Однако установка таких корпусов возможна с двух сторон платы. Жесткие *штыревые выводы* с ортогональной ориентацией относительно плоскости основания позволяют устанавливать микросхемы на плату без дополнительной поддержки даже при жестких вибрационных и ударных нагрузках. При совместной установке микросхем и ЭРЭ для упрощения монтажных работ следует рекомендовать корпуса со штыревыми выводами. Пластмассовые корпуса дешевы, обеспечивают хорошую защиту от механических воздействий, но хуже других типов корпусов защищают от климатических воздействий, перегрева.

3.4. Микросборки

Наивысшая плотность компоновки ЭА имеет место при использовании *бескорпусных* компонентов. Однако установка и монтаж последних непосредственно на печатной плате не обеспечивает высокой плотности компоновки из-за низкой разрешающей способности монтажа (на сегодняшний день возможности печатного монтажа практически исчерпаны). Введение в конструкцию промежуточного элемента — подложки — устранит этот недостаток.

Бескорпусные активные компоненты фиксируются клеем на подложке, на которой методом *тонко-* или *толстопленочной* технологии выполняются проводники, контактные площадки цепей входа и выхода, пленочные

пассивные компоненты. Подобные конструкции называют *микросборками*. Фактически микросборки представляют собой бескорпусные гибридные МС индивидуального применения. Интегральные микросхемы микросборок не обязательно должны быть согласованы по входу и выходу. Пассивная часть схемы микросборки обеспечит необходимую согласованность. По технологии производства микросборки не отличаются от гибридных микросхем, а по функциональной сложности и степени интеграции соответствуют БИС. В отличие от универсальных БИС, используемых в разнообразной аппаратуре, микросборки разрабатывают под конкретную аппаратуру для получения высоких показателей ее *микроминиатюризации,* уменьшения потерь полезного объема аппаратуры. Хотя разрешающая способность толстопленочной технологии ниже тонкопленочной, в ней сравнительно легко удается реализовать многослойные конструкции, повысить плотность компоновки.

Высокая насыщенность монтажа достигается использованием новых материалов и увеличением слоев коммутации. Материалом подложек микросборок могут быть некоторые виды стекол и керамики. Легкость получения гладких поверхностей и дешивизна являются основными преимуществами стекол. Однако низкая теплопроводность, препятствующая рассеиванию больших мощностей, хрупкость, трудность получения сложных форм подложек ограничивает их применение. Керамику отличает бóльшая механическая прочность, лучшая теплопроводность, хорошая химическая стойкость, но и повышенная стоимость и относительно грубая поверхность.

В качестве материалов подложек используется ситалл (материал на основе стекла), поликор (керамика на основе окиси алюминия), гибкие полиимидные пленки. Размеры ситалловых подложек обычно не превышают 48х60 мм, поликоровых — 24х30 мм.

Для увеличения механической жесткости и тепловой стойкости гибкие пленки чаще всего фиксируют на пластине из алюминиевого сплава. Максимальные размеры таких подложек составляют 100х100 мм, плотность разводки 5 линий/мм (минимальные ширина и зазоры между проводниками по 0,1 мм), шаг внутренних контактных площадок 0,3...0,5 мм, внешних — 0,625 мм.

3.5. Модули первого уровня

При конструировании модулей первого уровня выполняются следующие работы:

• изучение функциональных схем с целью выявления одинаковых по назначению подсхем и унификации их структуры в пределах конкретного изделия, что приводит к уменьшению многообразия различных подсхем и, следовательно, номенклатуры различных типов ТЭЗ;

• выбор серии микросхем, корпусов микросхем, дискретных ЭРЭ;

• выбор единого максимально допустимого числа выводов соединителя для всех типов модулей (за основу принимают число внешних связей наиболее повторяющегося узла в наборе узлов изделия с учетом цепей питания и нулевого потенциала и 5...10 %-ного запаса контактов на возможную модификацию);

• определение длины и ширины печатной платы. Ширина платы, как правило, кратна или равна длине соединителя с учетом полей установки и закрепления платы в модуле второго уровня. Требования по быстродействию и количество устанавливаемых на плату компонентов влияют на ее длину;

• собственно конструирование печатной платы;

• выбор способов защиты модуля от перегрева и внешних воздействий.

Широкое распространение получила плоская компоновка модуля, когда компоненты схемы устанавливают в плоскости платы с одной или двух сторон (рис. 2, 3 и 4 цветной вклейки). Для плоской компоновки характерна малая высота установки компонентов по сравнению с длиной и шириной платы. Простота выполнения монтажных работ, легкость доступа к компонентам и монтажу, улучшенный тепловой режим являются основными преимуществами плоской компоновки. Если для внешней коммутации модуля вводится соединитель, то подобную конструкцию называют ТЭЗ (рис. 3.2). На печатную плату устанавливают микросхемы *4* и для исключения влияния на работу микросхем помех по электропитанию — развязывающие конденсаторы *5*.

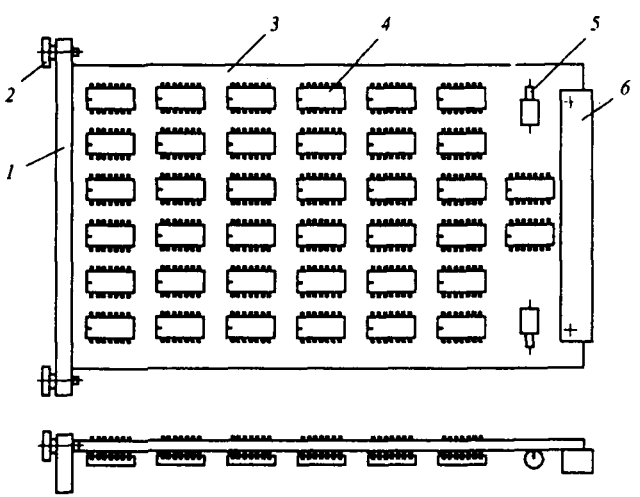


Рис. 3.2. Типовой элемент замены:

1 — лицевая панель; *2* — невыпадающий винт; *3* — печатная плата; *4* — микросхема; *5* — развязывающий конденсатор; *6* — электрический соединитель

Лицевая панель выполняет одновременно несколько функций. На ней располагают элементы индикации и управления, контрольные гнезда, иногда электрические соединители, которые коммутируются с платой проводным монтажом. На панели в резьбовое отверстие помещают невыпадающий винт *2*, которым ТЭЗ жестко фиксируется на несущей конструкции модуля второго уровня, наносится адрес, позволяющий отличить ТЭЗ среди подобных в наборе, реализующем конструкцию ЭА, а также предотвратить неправильную установку ТЭЗ. Несоответствие адреса установочного места в блоке с адресом лицевой панели ТЭЗ указывает о неправильной его установке.

Лицевые панели совместно с монтажными панелями модулей высших уровней направляют охлаждающий аппаратуру воздух к теплонагруженным компонентам. Чтобы предотвратить утечку воздуха из установочных мест, где по каким-либо причинам ТЭЗ отсутствуют, вместо них устанавливают заглушки (только лицевые панели ТЭЗ). Панель и электрический соединитель крепят к печатной плате винтовым или заклепочным соединением. В условиях жестких механических воздействий плату ТЭЗ устанавливают на рамку, что увеличивает жесткость конструкции.

При большом числе внешних цепей на ТЭЗ устанавливают несколько соединителей, располагающихся на одной или нескольких сторонах платы. В приведенной на рис. 3.3 конструкции ТЭЗ с двусторонним расположением соединителей стрелками показаны направления установки ТЭЗ в приборные соединители шасси блока, а затем кабельного соединителя, закрепленного на кронштейне, в приборный соединитель ТЭЗ.

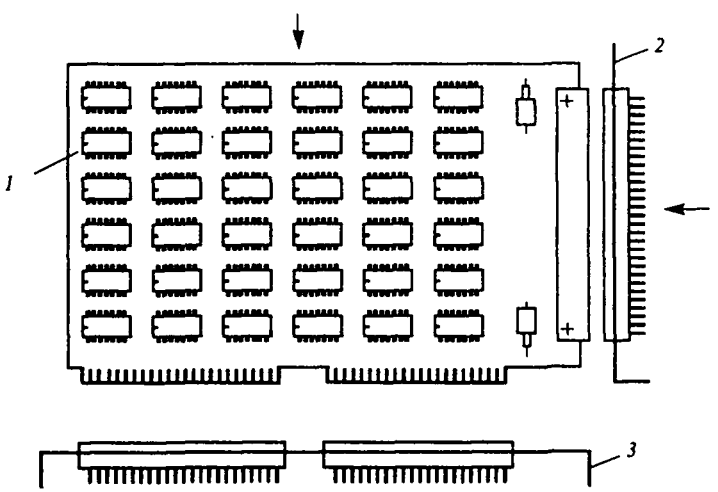


Рис. 3.3. ТЭЗ с тремя соединителями:

1 — ТЭЗ; *2* — кронштейн с кабельным соединителем; *3* — шасси блока

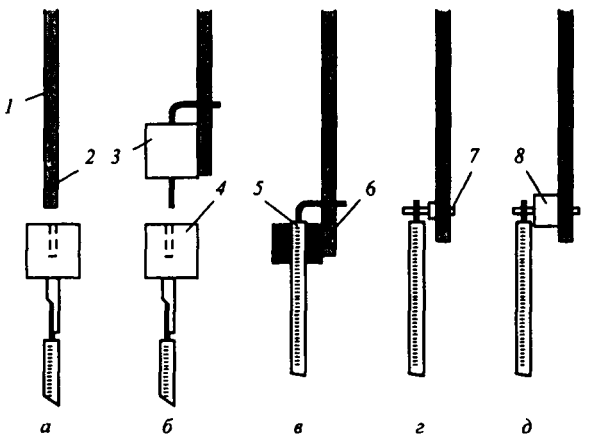


Рис. 3.4. Коммутация модулей первого уровня:

а — прямое сочленение ТЭЗ; *б* — косвенное сочленение ТЭЗ; *в, г, д* — коммутация паяным соединением; *1* — печатная плата; *2* — вилочный печатный соединитель; *3* — вилка соединителя косвенного сочленения; *4* — розетка; *5* — провод; *6* — прижимная планка; *7* — переходной штырек; *8* — переходная колодка

В блоках транспортируемой аппаратуры печатные платы модулей, как правило, закреплены жестко на несущей конструкции. Модули первого уровня коммутируются между собой приборными соединителями печатного монтажа (рис. 3.4, *а*, *б*), непосредственной подпайкой проводов к монтажным отверстиям плат (рис. 3.4, *в*), с использованием переходных штырьков (рис. 3.4, *г*) и колодок (рис. 3.4, *д*) (на рисунках показан вид сбоку на печатную плату).

Соединители обеспечивают наиболее быструю и легкую замену модулей и бывают прямого и косвенного сочленения. Вилка соединителя прямого сочленения является частью печатной платы, на которой одним из известных методов выполнения рисунка печатного монтажа получают контакты соединителя (печатные ламели). Розетка соединителя прямого сочленения бывает открытого и закрытого исполнения. В розетках открытого исполнения прорезь для установки печатной платы открыта с концов (отсюда подобное название), что позволяет устанавливать в нее различные по ширине платы. Розетки закрытого типа с концов ограничены торцевыми поверхностями и служат для установки плат фиксированной ширины. Взаимная ориентация модуля и розетки осуществляется перегородкой в розетке и пазом под эту перегородку в концевой части печатной платы. Фиксация модуля в розетке открытого исполнения производится за счет пружинящих контактов розетки, в розетке закрытого исполнения — еще и торцевыми поверхностями соединителя. Соединитель прямого сочленения разрабатывается под пла-

ту определенной толщины. Расстояние между соседними печатными ламелями выбирается из ряда: 1,25; 2,5;3,75 и 5 мм.

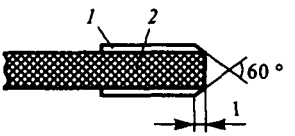


Рис. 3.5. Концевая часть вилочного печатного соединителя платы:

1 — печатная ламель; 2 — диэлектрическое основание

Надежная установка при вставлении модуля и предотвращение отслаивания печатных ламелей от платы обеспечивается некоторым заострением концевой части платы с ламелями (рис. 3.5). Малое омическое сопротивление и высокая износостойкость контактной пары ламель—пружинящий контакт розетки при низких усилиях контактирования достигается покрытием медных поверхностей ламелей серебром, палладием, золотом, родием. Толщина покрытия варьируется в пределах 3...50 мкм.

При конструировании печатных плат необходимо решать задачи:

- выбора проводниковых и изоляционных материалов, формы и размеров печатных плат, способов установки компонентов;
- определения ширины, длины и толщины печатных проводников, расстояний между ними, диаметров монтажных и переходных отверстий, размеров контактных площадок;
- трассировки печатного монтажа;
- оформления конструкторской документации.

3.6. Модули второго уровня

К модулям второго уровня относятся *блоки* различных видов. Конструкция одноплатного бескаркасного настольного прибора со встроенным блоком питания приведена на рис. 3.6 и 3.7. Несущей конструкцией прибора является основание *2*. Хотя размеры основания могут быть большими (300 × 450 мм и более), его обычно изготовляют из тонкого листового материала, а для придания жесткости в углах конструкции задается определенная форма.

Для закрепления модулей в основании прибора выполнены выдавки с отверстиями, в которые вставляют резьбовые втулки под винты.

Крышка *6* сдвигается, перемещаясь по вертикальным боковым стенкам детали *2*. Это позволяет на крышке *6* располагать техническое описание прибора, электрические схемы, измерительные приборы. Для закрепления крышки на основании предусмотрены кронштейны *4*, фиксируемые заклепками.

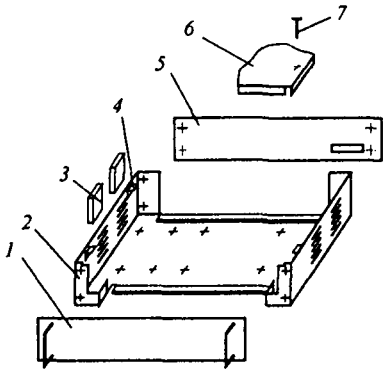


Рис. 3.6. Прибор настольный бескаркасный:

1 — лицевая панель; 2 — основание; 3 — вентилятор; 4 — кронштейн; 5 — задняя панель; 6 — крышка; 7 — винт

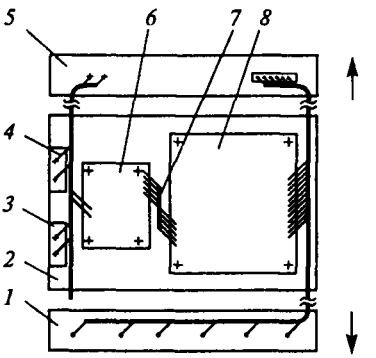


Рис. 3.7. Электромонтажная схема прибора настольного бескаркасного:

1 — лицевая панель; 2 — основание; 3 — вентилятор; 4 — провод; 5 — задняя панель; 6 — блок питания; 7 — жгут; 8 — плата электроники

На основание прибора устанавливают блок питания, плату операционного устройства (электроники) и вентиляторы, обеспечивающие нормальный тепловой режим прибора.

На электромонтажной схеме (см. рис. 3.7) задняя и передняя панели развернуты относительно установочной плоскости основания на 90°. В конструкцию введены: жгут сетевого напряжения, подводящий 220 В частотой 50 Гц к блоку питания и вентиляторам, жгут подвода постоянного напряжения от блока питания к плате электроники и жгут сигнальных проводов.

В том случае, если максимальные размеры платы *8* каким-нибудь образом ограничены, например, производственными возможностями или размерами основания прибора, то на плату электроники можно установить вместе с компонентами схемы электрические соединители, в которые, в свою очередь, установить ТЭЗ с недостающими компонентами схемы прибора (рис. 3.8). Таким образом, объединительная плата, представленная на рис. 3.8, является модификацией платы электроники. В зарубежной литературе такие платы называют *motherboard — материнской платой.*

Может случиться, что схема, реализуемая на плате, потребует размеров, которые не могут быть обеспечены современным производством. Тогда эта гипотетическая плата разбивается на несколько плат меньших размеров, объединяемых конструктивно в блоке монтажной панелью.

Возможные компоновочные формы блоков представлены на рис. 3.9. При одинаковых физических объемах блоков сферическая форма обеспечивает минимальную длину линий связей. Однако форма ТЭЗ в виде полукруга не является технологичной. При конструировании блоков ЭА применяют

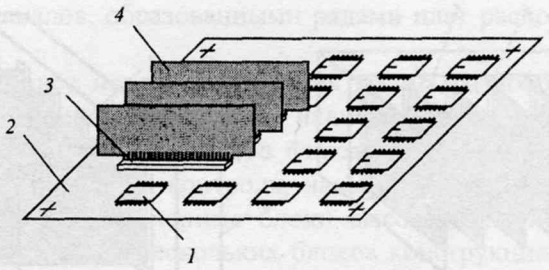


Рис. 3.8. Объединительная (материнская) плата:

1 — микросхема; *2* — объединительная плата; *3* — ответный электрический соединитель ТЭЗ; *4* — ТЭЗ

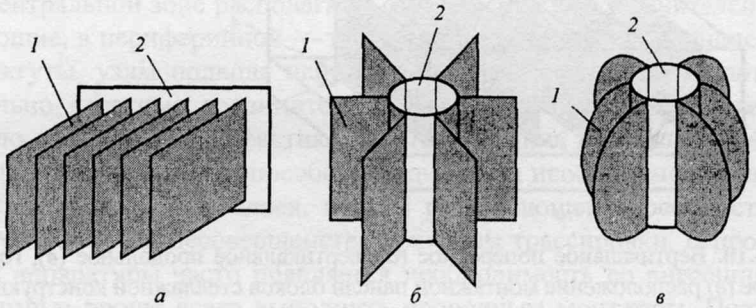


Рис. 3.9. Компоновочные схемы блоков в виде параллелепипеда (*а*), цилиндра (*б*), сферы (*в*):

1 — ТЭЗ; *2* — монтажная панель

стеллажный, этажерочный и книжный варианты конструкций в форме параллелепипеда в негерметичном и герметичном исполнении.

Блоки стеллажного типа (рис. 3.10) компонуются из ТЭЗ, которые устанавливаются в один или несколько рядов перпендикулярно монтажной панели. Основным конструктивным элементом блока является каркас *1* с монтажной панелью и соединителями *4*. В зависимости от ориентации в пространстве монтажной панели существуют три разновидности компоновочных схем блоков, приведенные на рис. 3.10.

Блоки с защитными кожухами и крышками являются самостоятельными изделиями (приборами) и в таком виде эксплуатируются. Обычно на переднюю панель прибора настольного типа устанавливают элементы индикации, измерительные узлы, элементы управления (кнопки, тумблеры и т. п.), электрические соединители. Элементы управления и соединители, не требующие частого доступа, а также предохранители выносят на заднюю панель. При компоновке изделий необходимо обеспечить свободный доступ к электрическим соединителям монтажных панелей для контроля и к ТЭЗ

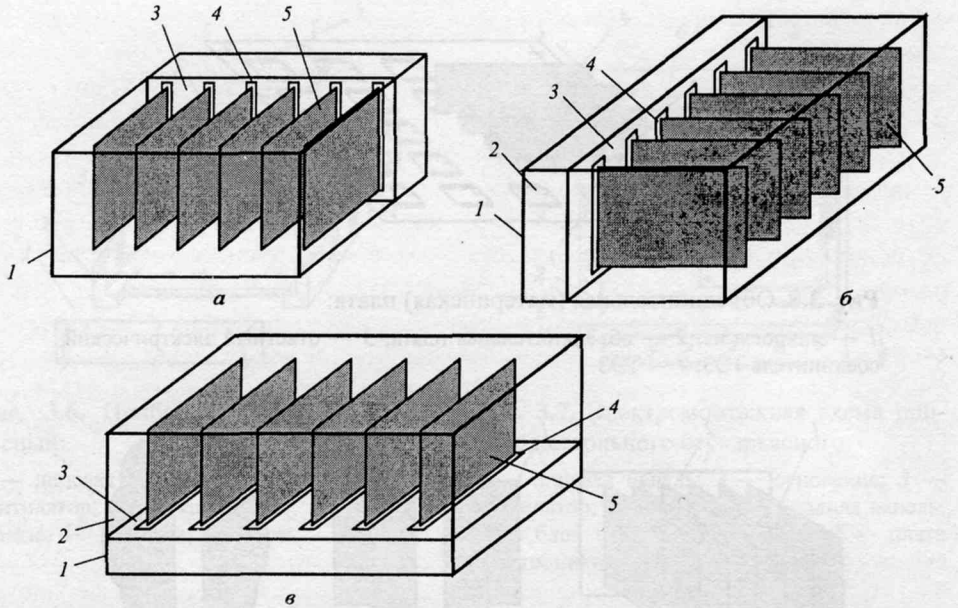


Рис. 3.10. Вертикальное поперечное (*а*), вертикальное продольное (*в*), горизонтальное (*в*) расположение монтажной панели блоков стеллажной конструкции:
1 — каркас; *2* — лицевая панель; *3* — монтажная панель; *4* — соединитель; *5* — ТЭЗ

для их замены. Если монтажная панель ориентирована горизонтально, то крышку и поддон прибора необходимо выполнять съемными, если вертикально — лицевую и заднюю панели нужно делать съемными или откидными.

При комплектации блоками рам и стоек шкафного типа в конструкции блоков не вводят кожухи или крышки. При значительной длине ТЭЗ (например, кассетной конструкции из нескольких плат) блок с вертикальным поперечным расположением монтажной панели (рис. 3.10, *а*) можно устанавливать непосредственно в стойку. Однако в современной аппаратуре длина одноплатных ТЭЗ редко превышает 200 мм, поэтому блоки данного типа следует устанавливать в промежуточный конструктивный элемент — раму, что позволит повысить плотность компоновки стоек. Поскольку глубина блока с вертикальным продольным расположением монтажной панели (рис. 3.10, *б*) зависит от количества установочных мест для ТЭЗ, то подобные блоки устанавливаются непосредственно в стойку, минуя раму.

Горизонтальное расположение монтажной панели (рис. 3.10, *в*) затрудняет охлаждение блоков естественной конвекцией, поэтому их обычно используют в приборах настольного типа с низкой плотностью компоновки, либо совместно с вентиляторами, направляющими потоки охлаждающего

воздуха вдоль каналов, образованными рядами плат расположенных по соседству ТЭЗ.

Конструктивное исполнение блоков весьма разнообразно, но у всех блоков можно отметить обязательное наличие монтажной панели (шасси), каркаса, направляющих и элементов фиксации в модуле высшего уровня. Упростить проектирование, контроль, наладку аппаратуры, а также получить функционально законченные блоки высокой плотности компоновки возможно при разработке нескольких блоков конструкционной системы на разное число ТЭЗ. Для этого разрабатывают несколько типоразмеров основных базовых деталей блоков и, в первую очередь, монтажных панелей.

На монтажных панелях выделяют центральную и периферийную зоны. В центральной зоне располагают ответные части соединителей ТЭЗ, направляющие, в периферийной — колодки или соединители внешней коммутации, жгуты, узлы подвода напряжения питания и нулевого потенциала. Желательно ответные соединители ТЭЗ устанавливать на многослойную печатную плату. Однако практика конструирования показала, что получить все соединения печатным способом трудно из-за необходимости разработки плат с большим числом слоев, низкой разрешающей способности многослойного монтажа и несовершенства программ трассировки. В процессе отработки аппаратуры часто появляется необходимость во внесении изменений, которые проще всего выполнить проводным монтажом. Поэтому при конструировании блоков кроме печатного используется монтаж одиночным проводом, свитой парой, жгутовой монтаж.

При монтаже блоков свитой парой около выходных контактов ответных частей каждого соединителя ТЭЗ необходимо иметь контакты заземления, к которым коммутируются нулевые провода свитых пар. Это можно выполнить, если землю реализовать в виде сплошного фольгированного слоя односторонней печатной платы. При монтаже блоков одиночными проводами и свитыми парами необходимость в поддержке монтажа не возникает. При использовании жгутов на монтажной панели блока предусматривают пазы или углубления, в которых жгуты размещают и закрепляют.

Направляющие вводятся в конструкции для быстрого сочленения ТЭЗ с ответными частями соединителей без заклинивания, зажима или перекоса, поддержки платы ТЭЗ при ударах и вибрациях, создания пути для кондуктивного отвода теплоты. Для входа и перемещения платы в направляющих по краям платы предусматривают свободную от печатного монтажа зону шириной 2—3 мм. Длина направляющих зависит от длины платы ТЭЗ. Различают коллективные направляющие, предназначенные для установки одновременно нескольких ТЭЗ (рис. 3.11, *а*), и индивидуальные (рис. 3.11, *б*).

В качестве конструкционных материалов направляющих используется пластмасса и металл. Тепловое сопротивление $R_т$ металлических направ-

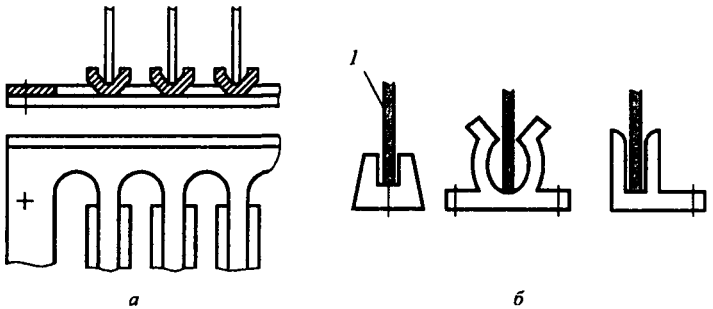


Рис. 3.11. Направляющие печатных плат ТЭЗ:
1 — печатная плата

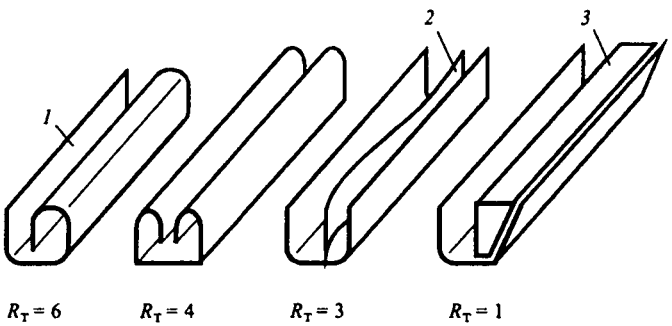


Рис. 3.12. Металлические направляющие:
1 — направляющая; *2* — плоская пружина; *3* — клин

ляющих ниже, чем пластмассовых, и зависит от конкретной конструкции. На рис. 3.12 представлены конструкции четырех направляющих с указанием относительных величин их тепловых сопротивлений. Минимальным тепловым сопротивлением обладает клиновая направляющая. После установки ТЭЗ клин *3* винтом плотно прижимается к поверхности платы. Для бокового перемещения клина в направляющей под винт должно быть выполнено фигурное отверстие.

Надежная коммутация ТЭЗ с ответной частью соединителя в блоке обеспечивается расчетом на сочленение соответствующих размерных цепей блока. При этом определяют по известному допуску замыкающего звена допуски составляющих размеров, либо номинальный размер и допуск замыкающего звена по заданным размерам и допускам составляющих звеньев.

Элементы крепления и фиксации должны исключить возможность выпадения ТЭЗ при воздействии ударов и вибраций. Предусматривается индивидуальное или групповое крепление ТЭЗ. Для индивидуального крепления рекомендуется использовать невыпадающие винты, защелки. В боль-

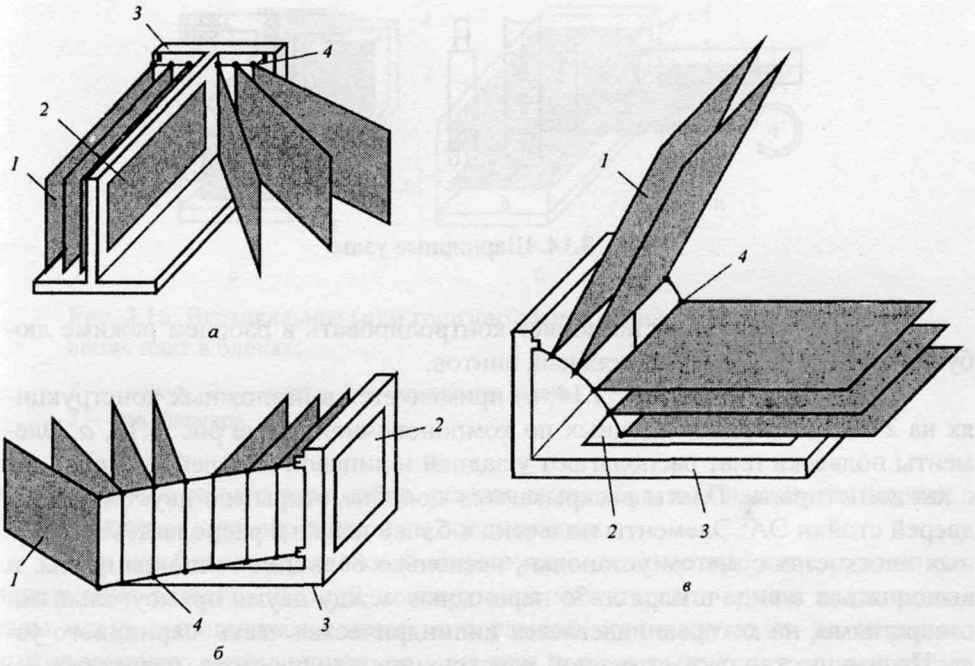


Рис. 3.13. Вертикальная (*а*, *б*) и горизонтальная (*в*) оси раскрытия блоков книжной конструкции:

1 — плата в сборе; *2* — коммутационная печатная плата; *3* — несущая конструкция блока; *4* — шарнирный узел

шинстве случаев групповое крепление осуществляется прижимной крышкой с наклеенной с внутренней стороны пористой прокладкой. После установки всех ТЭЗ в блок со стороны лицевых панелей крепится винтами прижимная крышка.

В блоках *книжной конструкции* (рис. 3.13) механическое объединение печатных плат между собой и с несущей конструкцией обеспечивается шарнирными узлами *4*, позволяющими поворачивать платы *1* подобно страницам книги. В рабочем состоянии платы *1* объединяют в пакет стяжными винтами или резьбовыми шпильками. Возможны вертикальная (рис. 3.13, *а*, *б*) и горизонтальная (рис. 3.13, *в*) ориентация плат в блоке. Блоки устанавливают в стойку или монтажное устройство. Электрические соединения выполняют объемными проводами, печатными жгутами, паяными соединениями. Проводники и жгуты подпаиваются к платам *1* со стороны подвески плат и к коммутационной плате *2*, осуществляющей коммутацию плат *1* согласно принципиальной схеме. На задней панели несущей конструкции блока устанавливают внешние соединители.

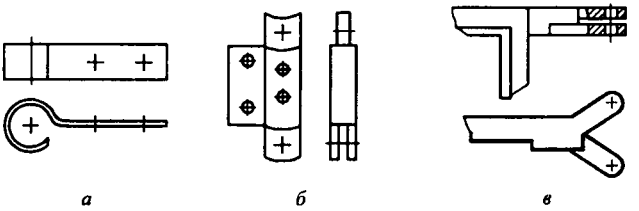


Рис. 3.14. Шарнирные узлы

Конструкция блока позволяет контролировать в рабочем режиме любую плату после удаления стяжных винтов.

Шарнирный узел (рис. 3.14, *а*) применяется в несложных конструкциях на 2—4 платы, выполненных по компоновочной схеме рис. 3.13, *а*. Элементы подвески плат располагают у задней и лицевой панелей блока по два с каждой стороны. Платы раскрываются подобно открытию двустворчатых дверей стойки ЭА. Элементы подвески в блоке должны располагаться в разных плоскостях с шагом установки, несколько бóльшим толщины платы, и выполняться в виде штыря либо перемычки между двумя прямоугольными отверстиями, на которые надевается цилиндрическая часть шарнирного узла. Преимущество рассмотренной конструкции в ее простоте, недостаток — некоторое увеличение длин электрических соединений за счет размещения элементов подвески на противоположных сторонах блока.

В сложных конструкциях используют шарнирные узлы, представленные на рис. 3.14, *б* и *в*. Несколько шарнирных узлов совместно с платами штифтовым соединением или каким-либо другим способом объединяются в наборы — пакеты, которые крепятся к несущей конструкции блока. Если печатная плата фиксируется на рамке, то удобно рамку и шарнирные узлы совместить в единой конструкции (см. рис. 3.14, *в*).

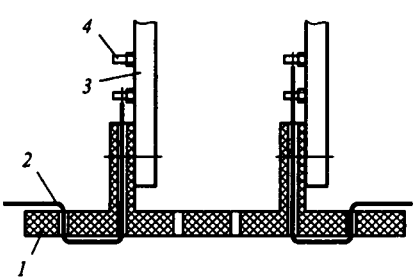


Рис. 3.15. Установка плат на гибкий резиновый ремень:

1 — ремень; *2* — провод; *3* — печатная плата в сборе; *4* — штыревой контакт

Уменьшение объема и массы, а также длин соединений достигается использованием в конструкции *гибкого резинового ремня 1* (рис. 3.15). Ремень по ширине должен соответствовать ширине платы *3*, а по длине — количеству и шагу установки плат в блоке. Сквозные отверстия по всей поверхности ремня служат для прошивки и фиксации монтажных проводов. Межплатные и внешние связи осуществляются одиночными объемными проводами *2*, подпаиваемыми к штыревым контактам *4*. Про-

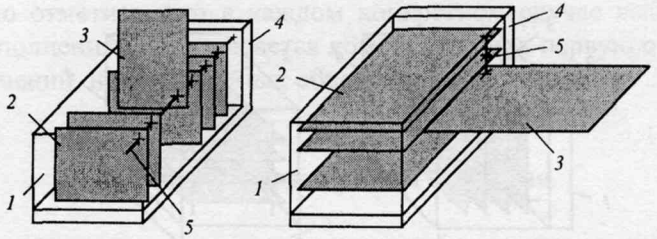


Рис. 3.16. Вертикальное (*а*) и горизонтальное (*б*) направления откидывания плат в блоках:

1 — кожух; *2* — плата; *3* — откинутая плата; *4* — несущая конструкция; *5* — ось шарнира

вода на ремне не должны иметь резких перегибов и больших натяжений. Плата крепится к ремню винтовым соединением.

Как и в блоках стеллажной конструкции, конкретное конструктивное исполнение блоков книжной конструкции может различаться: шарнирные узлы могут выполняться совместно с рамкой, индивидуально, на шарнирный узел может устанавливаться одна или несколько плат и т. д., коммутация может осуществляться печатным или объемным вязаным жгутом, одиночными проводниками и т. д. Однако правила объединения конструктивных элементов и узлов остаются неизменными.

В блоках с откидными платами (рис. 3.16) платы *2* механически объединяют между собой и с несущей конструкцией *4* подвижным соединением на оси *5*, позволяющим обеспечивать поворот (откидывание) любой платы и контроль этой платы в откинутом положении при функционировании блока. Конструкцией должна быть предусмотрена фиксация платы в откинутом состоянии. В рабочем состоянии платы объединяют в пакет и крепят к несущей конструкции. Электрические соединения выполняют объемными проводами, жгутами, соединителями. При разработке электромонтажной схемы блока необходимо предусмотреть подвижность монтажа, например, искусственным увеличением длины жгута для обеспечения откинутого положения платы. Возможны вертикальное и горизонтальное направление откидывания плат. В качестве недостатка этого вида компоновки следует отметить некоторое увеличение длины монтажных проводов.

Этажерочная компоновка блока (рис. 3.17) достигается параллельным объединением между собой плат *3* и установочной панели в единую конструкцию стяжными винтами *2*. Нужный шаг установки между платами пакета обеспечивается введением в конструкцию распорных втулок. Несущей конструкцией блока является установочная панель. Возможны вертикальная

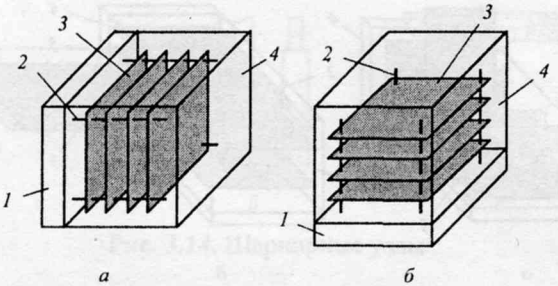


Рис. 3.17. Вертикальное (*а*) и горизонтальное (*б*) расположение установочной панели в блоках этажерочной конструкции:

1 — установочная панель; *2* — стяжной винт; *3* — плата; *4* — кожух

и горизонтальная установка панели в модуле высшего уровня. На выбор способа ориентации панели влияет конструкция, тепловой режим блока, а также характер и направление внешних механических воздействий. Межплатные электрические соединения в блоке осуществляют жгутовым монтажом, фиксированным паяным, разъемными соединениями. Внешние соединители должны устанавливаться на несущей конструкции блока *1*. Основным преимуществом данного типа компоновки является простота конструкции, недостатком — низкая ремонтопригодность. Можно рекомендовать при конструировании несложной аппаратуры на микропроцессорах.

Кроме рассмотренных компоновочных схем блоков возможны различные их комбинации. Например, блок состоит из двух *субблоков*, объединяемых в книжную или откидывающуюся конструкцию, а каждый субблок имеет стеллажную или этажерочную компоновку.

Ориентация и расстояния между платами ТЭЗ зависят от технических требований на аппаратуру, теплового режима, характера и направлений внешних воздействий. Выбор варианта конструкции диктуется производственными и техническими требованиями на основе анализа основных определяющих факторов. Производственные условия рекомендуют применять однотипные конструкции ТЭЗ, элементов несущих конструкций, фиксации, крепления, монтажа.

В зависимости от сложности ЭА и возможностей объекта эксплуатации в герметичный корпус блока устанавливают один или несколько пакетов модулей первого уровня. Компактные герметичные блоки могут размещаться в любом месте объекта эксплуатации, что является преимуществом подобной компоновки, но при этом возрастают длины электрических соединений между блоками. Установка блоков на специально вводимую несущую конструкцию (раму) позволяет разместить блоки компактно в одном месте, уменьшить длины связей, но масса аппаратуры увеличивается за счет рамы.

Необходимо отметить, что в каждом конкретном случае выбор конструктивного исполнения блока решается комплексно и, в первую очередь, с учетом ограничений, накладываемых объектом эксплуатации.

3.7. Модули третьего уровня

Модуль третьего уровня конструктивной иерархии — шкафная стойка, стойка, шкаф — предназначен для установки и коммутации блоков или рам и обеспечения их работоспособности в составе ЭА (рис. 6 цветной вклейки).

Конструктивной основой любой стойки является каркас, обычно изготавливаемый из стального уголкового профиля или труб прямоугольного или квадратного сечений, использование которых по сравнению с уголковым профилем позволяет снизить материалоемкость конструкций. На рис. 3.18 представлен каркас шкафной стойки, который собирается из двух боковин *3*, нижнего *8* и верхнего *2* оснований каркаса. Боковины и основания сварены из труб прямоугольного и квадратного сечений и в единую конструкцию объединяются болтовым соединением. Для этого в трубы боковин и оснований в местах болтовых соединений помещаются вкладыши, имеющие форму и размеры поперечного сечения, равные форме и размерам поперечного сечения отверстий труб. Вкладыши обеспечивают требуемую жесткость соединения и предохраняют от сминания трубы при завинчивании болтов деталей каркаса. Чаще всего каркас стойки выполняется цельносварным.

На каркасе закрепляется крышка *1* с вентиляционными отверстиями, два боковых щита *4* и подвешиваются дверцы *10* (на рис. 3.18 показаны один щит и одна дверца). Для придания жесткости с внутренней стороны поверхности щита и дверцы приваривается элемент жесткости *5*, проходящий по всей высоте дверцы и щита. Щит *4* к боковине каркаса *3* закрепляется с внутренней стороны стойки винтовым соединением. Для этого

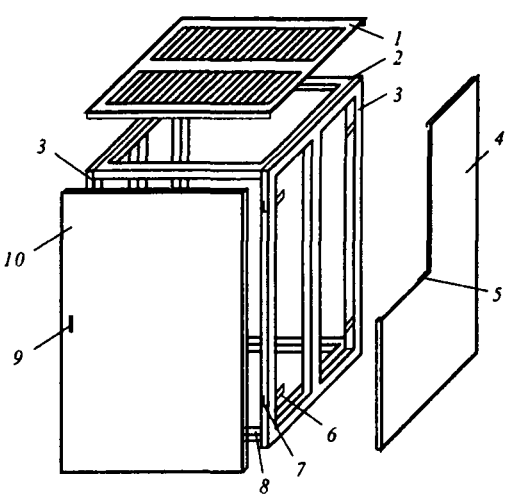


Рис. 3.18. Каркас шкафной стойки:

1 — крышка; *2* — верхнее основание каркаса; *3* — боковина; *4* — щит; *5* — элемент жесткости щита; *6* — кронштейн; *7* — подвеска дверцы; *8* — нижнее основание каркаса; *9* — ручка; *10* — дверца

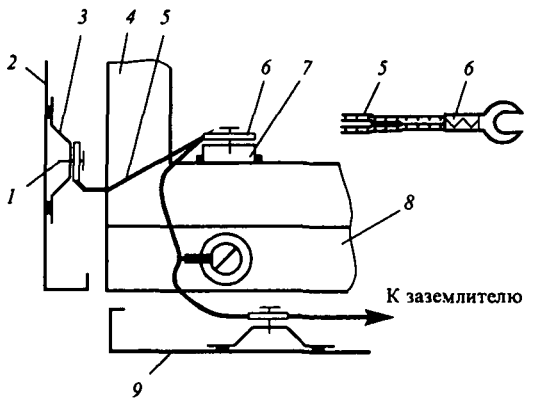


Рис. 3.19. Заземление стойки:

1 — винт; *2* — дверца; *3* — скоба; *4* — основание; *5* — оплетка; *6* — контактный лепесток; *7* — бобышка; *8* — боковина; *9* — щит

по периметру боковин *3* каркаса приваривают кронштейны *6*, и напротив, в соответствующих местах щита — скобы с отверстиями под резьбу. Щит подтягивается к каркасу и фиксируется по всей плоскости боковины *3*. Дверцы *10* подвешиваются на петлях к подвескам *7* и имеют кнопку-ручку *9*, при нажатии на которую защелка выходит из фиксируемого положения и под действием отжимной пружины свободный край дверцы отходит от каркаса. К использованию магнитных защелок нужно подходить осторожно, так как при этом неизбежно появление магнитных полей и возможно их влияние на работающую аппаратуру.

Дверцы и щиты должны плотно прилегать к каркасу без щелей, через которые происходит утечка охлаждающего воздуха, а внутрь стойки проникает пыль, внешние электрические, магнитные и электромагнитные поля.

По требованиям техники безопасности, а также из соображений экранирования стойки электрическое сопротивление между деталями каркаса, дверцами и щитами должно быть минимальным. Для этого все детали каркаса, щиты, дверцы электрически объединяют оплеткой экранированного проводника с контактными лепестками *«под винтовое соединение»* (рис. 3.19). На детали каркаса привариваются бобышки, на щиты и дверцы — скобы. В бобышках и скобах нарезают резьбовые отверстия, зачищаются до металлического блеска установочные поверхности каким-либо механическим способом и устанавливаются контактные лепестки оплетки. Оплетка, коммутирующая дверцы, должна иметь некоторое провисание и крепиться в местах подвески, чтобы свободно открывать и закрывать дверцы.

Принципы построения компоновочных схем шкафных стоек приведены на рис. 3.20, где стрелками показана входимость (установка) модулей разного уровня. ТЭЗ *5* является составной частью неразъемного блока *3* и разъемных вставных блоков *4* и *10*. Разъемный вставной блок *9* (кассетная конструкция) представляет коммутационную печатную панель с соединителем *8* и несколькими печатными платами *7* с микросхемами. Блоки *3*, *4*, *9*, *10* устанавливают либо непосредственно в стойку *1*, либо в промежуточный модуль — раму *2*, а раму уже монтируют в стойку.

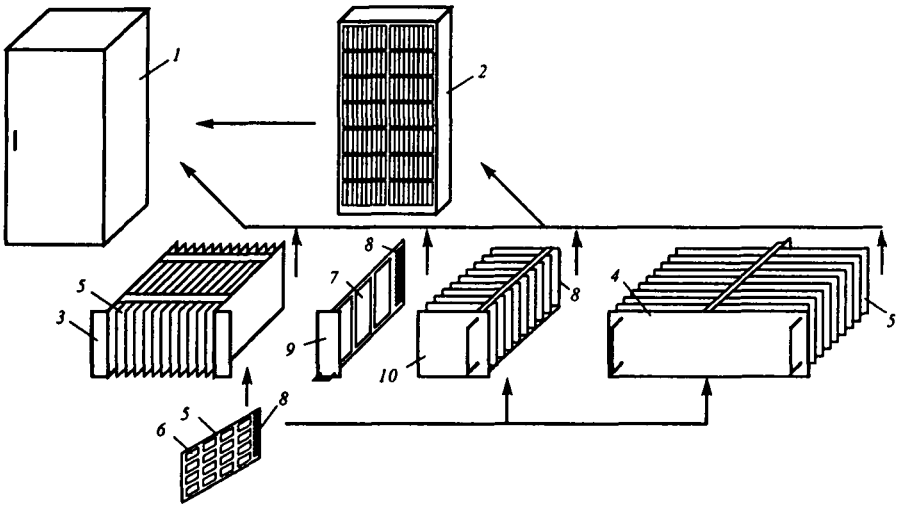


Рис. 3.20. Принципы компоновки шкафных стоек:

1 — каркас; *2* — рама; *3* — неразъемный блок; *4, 9, 10* — разъемные вставные блоки; *5* — ТЭЗ; *6* — микросхема; *7* — печатная плата в сборе; *8* — соединитель

Неразъемные блоки *3* размещают по всей высоте каркаса стойки или рамы и жестко закрепляют. Блоки в стойке коммутируют жгутом, закрепляемым на монтажной панели стойки. Этот же жгут подводит сигнальные цепи к соединителям внешней коммутации, размещаемым на боковых поверхностях или поддоне стойки.

Установку и закрепление блоков на каркасе стойки, минуя раму, используют, если ТЭЗ *5* имеет длину, позволяющую полезно использовать всю глубину стойки (глубина стойки, как правило, варьируется в пределах 600...800 мм). Однако при конструировании ЭА на МС печатная плата ТЭЗ может иметь существенно меньшие размеры. При малой длине платы и установке блоков *3*, *9* непосредственно в стойку возникает необходимость в использовании стоек малой глубины, которые при механическом воздействии могут легко упасть. Предотвратить этот недостаток возможно:

- искусственным увеличением глубины стойки и площади опоры, что приведет к потерям объема стойки и уменьшению плотности компоновки аппаратуры — одного из основных показателей конструкции;
- жестким закреплением основания стойки на объекте эксплуатации;
- использованием блоков 4, 10 с вертикальным продольным расположением монтажной панели, позволяющим размещать ТЭЗ по всей глубине стойки;
- установкой рам в стойку.

Компоновка стоек вставными разъемными блоками широко используется при конструировании транспортируемой (бортовой) аппаратуры и стоек электропитания. Внешняя коммутация блоков осуществляется приборными или приборно-кабельными соединителями, обеспечивающими быструю замену блоков. Введение приборно-кабельного соединителя обеспечивает работу ЭА при частично выдвинутом или удаленном из стойки для контроля блоке, но приводит к увеличению длин соединений и, как следствие, понижению быстродействия.

Установка на блок приборного соединителя не удлиняет соединений, но для проверки его работоспособности в составе стойки требуется ее отключение, установка блока в переходное устройство, искусственно смещающее ответный соединитель монтажной панели к лицевым панелям блока, включение аппаратуры и собственно контроль. Подобные действия увеличивают время подготовки для выполнения операций контроля, а введение переходного устройства может привести к искажению сигналов.

При использовании приборно-кабельных соединителей приборная часть соединителя устанавливается на тыльную сторону блока, блок вставляется и фиксируется в стойке. В стойке отсутствует монтажная панель, а коммутация блоков обеспечивается кабелями, закрепляемыми в пазах стойки на стороне, противоположной лицевым панелям блоков. Ответные части кабельных соединителей вставляются в приборные блоки и фиксируются на блоках.

Главное требование к вставным разъемным блокам — их функциональная и конструктивная законченность. Однако схемы, предназначенные для конструктивной реализации блоками, как правило, имеют разную степень сложности и, если разрабатывать единую конструкцию блока для самой сложной схемы, то для менее сложных схем часть конструктивного пространства блоков не будет использоваться. Поэтому в конструкцию стойки вводят основной *базовый* блок *3*, имеющий наибольшие размеры и устанавливаемый по всей ширине каркаса стойки, и *частичные* вставные блоки *9*, *10*, составляющие по ширине *часть* основного, но размещаемые в той же стойке, что и основной.

На рис. 3.21 приведен пример компоновки стойки частичными вставными блоками, установка которых в стойку производится в вводимые и закрепляемые на каркасе *1* коробчатые конструкции с направляющими *3* или установочные панели для направляющих, жестко фиксируемые на каркасе *1*. Направляющие *3* устанавливают по месту в зависимости от размеров, формы и числа размещаемых на одном горизонтальном уровне блоков. Блоки с зазором 20...30 мм устанавливают по высоте каркаса рядами и жестко фиксируют на коробчатой конструкции *2*. Установка основного базового блока подобна установке частичных блоков.

Часто в одной и той же стойке размещаются неразъемные и разъемные вставные блоки. Первые, как правило, осуществляют обработку информации, а вторые — охлаждение и снабжение электропитанием блоков обработки информации.

Шкафная стойка рамной конструкции компонуется из блоков, глубина которых во много раз меньше глубины каркаса стойки. В этом случае блоки устанавливают в промежуточную конструкцию — раму. В стойке размещают несколько рам. Количество рам зависит от глубины стойки и рамы. Глубина рамы несколько больше глубины устанавливаемых в стойку блоков (с учетом объема межблочной коммутации). В единую конструкцию рамы объединяются каркасом стойки.

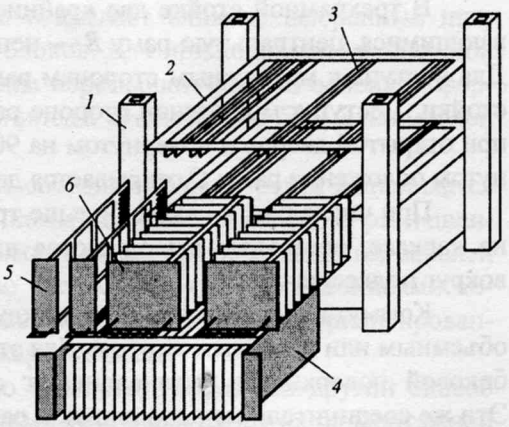


Рис. 3.21. Компоновка стойки блоками:

1 — каркас стойки; *2* — коробчатая конструкция; *3* — направляющая; *4* — базовый блок; *5, 6* — частичные блоки

В двухрамной стойке для доступа к монтажным сторонам и лицевым панелям блоков одна из рам или даже обе рамы (рис. 3.22) выполняют поворачивающиеся вокруг оси подвески. При открытых дверцах и рамах, находящихся в рабочем вдвинутом состоянии, рамы ориентируют монтажными сторонами наружу, что позволяет контролировать сигнальные цепи блоков рамы контрольно-измерительной аппаратурой. Для замены любого из ТЭЗ подвижную раму поворачивают на 90° и фиксируют в данном положении (штрихпунктирная линия на рисунке).

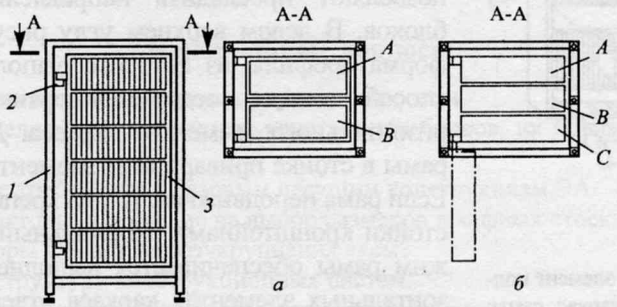


Рис. 3.22. Двух- (*а*) и трехрамная (*б*) шкафная стойка:

1 — каркас стойки; *2* — подвеска рамы; *3* — рама

В трехрамной стойке две крайние рамы *А* и *С* выполняют поворачивающимися, центральную раму *В* — неподвижной, фиксируемой на каркасе. Для доступа к монтажным сторонам рам *А* и *С* достаточно открыть дверцы стойки. Доступ к монтажной стороне рамы *В* возможен со стороны рамы *А* при открытой дверце и повернутом на 90° положении этой рамы. При повернутом положении рамы *С* открывается доступ к лицевым панелям рам *В* и *С*.

При числе рам в стойке больше трех одна из рам жестко закрепляется на каркасе, остальные выполняются выдвижными и поворачивающимися вокруг подвески.

Коммутацию в стойке рам между собой удобно выполнять плоским объемным или печатным жгутом. Для этой цели со стороны подвески рам на боковой поверхности устанавливают соединители внешней коммутации. Эти же соединители на неподвижной раме можно использовать для межстоечной коммутации. В качестве дополнительных соединителей внешней коммутации можно рекомендовать крайние соединители ТЭЗ блоков.

3.8. Рамы

Рама в стойке служит для установки и коммутации неразъемных и разъемных вставных блоков. Конструктивной основой рамы является каркас с направляющими. Каркас чаще всего выполняется из нормализованного профиля сварным способом, что придает ему высокую жесткость. На рис. 3.23 приведена компоновочная схема рамы на шесть блоков. Пять неразъемных блоков жестко фиксируются боковинами на каркасе рамы *3*, вставной разъемный блок *5* (блок вентиляции) по направляющим вставляется в каркас рамы и фиксируется невыпадающими винтами. На рис. 3.23 один из неразъемных блоков и блок вентиляции условно показаны выдвинутыми из каркаса. Пунктирные линии позволяют проследить направление установки блоков. В левом верхнем углу рисунка показана форма профиля, из которого выполнен каркас и способ углового соединения вертикального и горизонтального элементов каркаса. Для фиксации рамы в стойке приваривают элементы подвески *2*. Если рама неподвижная, то она крепится к каркасу стойки кронштейнами. Нормальный тепловой режим рамы обеспечивается выполнением в горизонтальных элементах каркаса отверстий для охлаждающего воздуха (входных в нижней части и выходных в верхней).

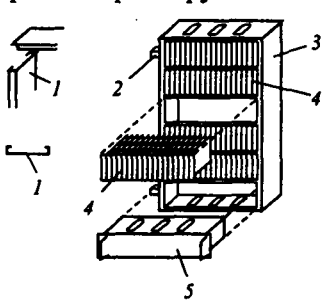


Рис. 3.23. Рама:

1 — профиль; *2* — элемент подвески рамы; *3* – каркас рамы; *4* — неразъемный блок; *5* — вставной разъемный блок

На конструкцию каркаса рамы оказывает влияние выбранный профиль, конструкция устанавливаемых блоков. Для придания дополнительной жесткости в каркас могут быть введены перемычки. Однако основной формой каркаса рамы является параллелепипед с существенно большей высотой и малой глубиной.

Коммутация сигнальных цепей соседних блоков рамы выполняется соединением одноименных выводов коммутационных колодок, размещенных на обращенных друг к другу горизонтальных краях монтажных панелей блоков, блоков расположенных не по соседству — коммутационными колодками, расположенными у вертикальных краев, и жгутом, ориентированным вертикально и закрепленным на каркасе рамы.

Для блоков, расположенных по соседству, возможен другой способ коммутации, когда жгут с соединителями устанавливается не на монтажной стороне рамы, а внутри блоков, как правило, на периферии, совместно с типовыми элементами замены. Для этого в местах прохода жгутов удаляются направляющие ТЭЗ, вилочные соединители кабеля устанавливаются в ответные соединители ТЭЗ. Такой способ коммутации приводит к уменьшению числа размещаемых в блоке типовых элементов замены.

Кронштейны с соединителями со стороны подвески рамы осуществляют внешнюю коммутацию рамы. Входные и выходные цепи блоков объемным монтажом соединяются с хвостовиками контактов соединителей внешней коммутации. Подвод напряжения питания и нулевого потенциала удобно выполнять узлом, представляющим собой стянутую в единую конструкцию систему проводниковых и изолирующих пластин (шин) шириной 20...30 мм, установленных со стороны подвески рамы. В местах отвода напряжения питания и нулевого потенциала на проводниковых пластинах должны иметь место контактные лепестки или штыри, к которым коммутируются объемные проводники, передающие питающее напряжение и нулевой потенциал к соответствующей шине питания и земли, но уже блоков.

Контрольные вопросы

1. Назовите правила выбора типа корпусов микросхем.
2. Сравните стеллажные и книжные конструкции блоков, их преимущества и недостатки.
3. Перечислите требования к базовым несущим конструкциям ЭА:
4. Назовите факторы, влияющие на выбор размеров шкафных стоек.
5. Какие факторы влияют на разукрупнения схем?
6. Приведите структуру конструкционных систем.
7. Назовите критерии выбора конструкционных систем.

4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ КОНСТРУКЦИИ ЭА

4.1. Защита конструкции от механических воздействий

На ЭА в процессе транспортирования и эксплуатации воздействуют внешние механические факторы (вибрации, удары, ускорения, акустические шумы), передающие ей механическую энергию. Количество переданной энергии определяет уровень и характер изменения конструкции. Допустимые уровни механического изменения конструкции определяются ее *прочностью* и *устойчивостью* к механическим воздействиям.

Под *прочностью* конструкции понимается способность аппаратуры выполнять функции и сохранять параметры после приложения механических воздействий. *Устойчивость* конструкции — способность ЭА сохранять функции и параметры в процессе механических воздействий.

Откликом, или *реакцией* конструкции на механические воздействия называют любые формы трансформации или преобразования энергии механического возбуждения. Разновидности откликов:

- механические напряжения в элементах конструкции;
- перемещения элементов конструкции и их соударения;
- деформации и разрушения конструктивных элементов;
- изменения свойств и параметров конструкции.

Механические воздействия могут приводить к непредусмотренным взаимным перемещениям деталей и узлов из-за возникающих инерционных сил и, как следствие, деформациям крепежных, несущих и других элементов конструкций, их соударению. При незначительных механических воздействиях в элементах конструкций возникают упругие деформации, фактически не сказывающиеся на работоспособности аппаратуры. Увеличение нагрузки приводит к появлению остаточной деформации и при определенных условиях разрушению конструкции. Разрушение может наступить и при нагруз-

ках, много меньших предельных значений статической прочности материалов, если конструкция окажется подверженной знакопеременным нагрузкам.

Отказы аппаратуры бывают *восстанавливаемыми* после снятия или ослабления механического воздействия (чисто механическое проявление вибраций и ударов, изменение параметров компонентов, возникновение электрических шумов) и *невосстанавливаемыми* (обрывы и замыкания электрических соединений, отслаивание проводников печатных плат, нарушение элементов крепления и разрушение несущих конструкций).

Конструкция как колебательная система

Основными параметрами любой конструкции с позиций реакции на механические воздействия являются масса, жесткость и механическое сопротивление (демпфирование). При анализе влияния вибраций на конструкции модулей последние представляют в виде системы с сосредоточенными параметрами, в которой заданы масса изделия m, элемент жесткости в виде пружины и элемент механического сопротивления в виде демпфера (рис. 4.1), характеризующиеся параметрами k и r соответственно.

При необходимости построения более сложных моделей, например пластины с установленными на ней модулями, можно воспользоваться моделью, приведенной на рис. 4.1, повторяя ее многократно. Стремясь в пределе к бесконечному числу моделей в пределах объема конструкции, получим модель системы с распределенными параметрами (рис. 4.2).

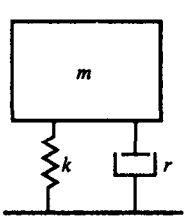


Рис. 4.1. Модель механической системы с одной степенью свободы

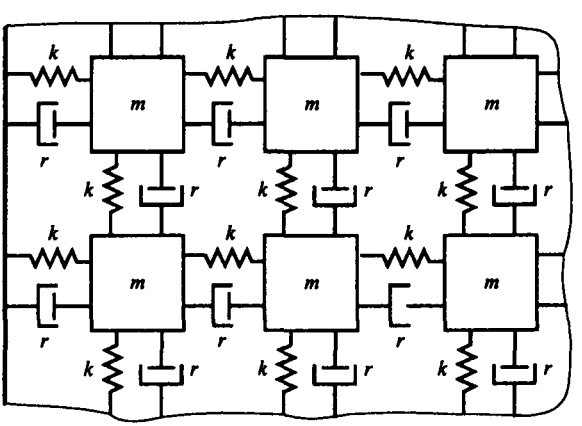


Рис. 4.2. Модель системы с распределенными параметрами

Важнейшим показателем любой механической системы является *число степеней свободы*, однозначно определяющих положение системы в пространстве в любой момент времени. Число степеней свободы реальной конструкции зависит от степени ее упрощения, т. е. модель должна отображать реальную конструкцию и быть достаточно простой для исследования.

В системе с одной степенью свободы внешней силе $F(t)$ в каждый момент времени будут противодействовать силы инерции массы F_m, жесткости F_k и демпфирования F_r:

$$F(t) = F_m + F_r + F_k. \tag{4.1}$$

Составляющие правой части уравнения (4.1) определяются из

$$F_m = m\frac{d^2\xi}{dt^2}, \quad F_r = r\frac{d\xi}{dt}, \quad F_k = k\xi,$$

где ξ — смещение системы от положения равновесия под воздействием силы $F(t)$.

Линейное дифференциальное уравнение

$$m\frac{d^2\xi}{dt^2} + r\frac{d\xi}{dt} + k\xi = F(t) \tag{4.2}$$

описывает состояние системы в любой момент времени.

Уравнение собственных колебаний системы можно получить, приравняв $F(t)$ нулю:

$$m\frac{d^2\xi}{dt^2} + r\frac{d\xi}{dt} + k\xi = 0. \tag{4.3}$$

Решение уравнения (4.3) обычно записывается в виде

$$\xi = \xi_0 e^{-\delta t}\sin(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где ξ_0 и φ_0 — начальные амплитуда и фаза колебаний; $\delta = r/(2m)$ — коэффициент демпфирования; $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m} - \delta^2} = 2\pi f_0$ — собственная круговая частота колебаний; $f_0 = \omega_0/(2\pi)$ — собственная частота колебаний системы с демпфированием.

В реальных механических системах в каждом цикле колебаний происходят потери энергии, в результате чего колебания затухают.

Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний системы имеет вид

$$m\frac{d^2\xi}{dt^2} + r\frac{d\xi}{dt} + k\xi = F(t) = F_m\sin(\omega t + \varphi). \tag{4.4}$$

Решение уравнения

$$\xi = A_0 e^{-r\omega_0 t} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + A_в \sin(\omega t + \varphi)$$

состоит из двух слагаемых: первое описывает собственные колебания системы с частотой ω_0, второе — вынужденные колебания с частотой ω, где A_0 и $A_в$ — амплитуда соответственно собственных и вынужденных колебаний.

Когда частота собственных колебаний системы близка к частоте вынужденных, в колебательной системе возникает явление механического *резонанса*, при котором резко возрастает амплитуда колебательного движения элементов конструкции, что может привести к их поломкам.

Важным параметром любой механической системы является *добротность*

$$Q = k/(\omega_0 r) = \omega_0 m/r.$$

Если известны собственные частоты колебаний f_{0i} всех n элементов системы, то собственную частоту колебаний самой системы f_{0c} можно определить из выражения

$$\frac{1}{f_{0c}^2} \approx \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{f_{0i}^2}.$$

Падение блока на жесткую поверхность равносильно воздействию на него удара. Колебательное движение блока, представляемого в виде механической системы с одной степенью свободы, относительно положения равновесия без учета демпфирования ($\delta = 0$) будет описываться дифференциальным уравнением свободных колебаний

$$m\frac{d^2\xi}{dt^2} + k\xi = 0.$$

При начальных условиях $t = 0$, $\xi = \xi_{ст}$, $d\xi/dt = v_0$ ударное смещение блока будет описываться уравнением

$$\xi(t) = (v_0/\omega_0)\sin\omega_0 t - \xi_{ст}\cos\omega_0 t,$$

где $\xi_{ст} = mg/k$ — прогиб элемента жесткости блока под действием массы блока; $v_0 = \sqrt{2gh}$ — начальная скорость блока; g — ускорение свободного падения; h — высота падения блока; $\omega_0 = \sqrt{k/m}$.

Максимальное и полное динамическое смещения упругого элемента будут

$$\xi_{max} = \sqrt{\xi_{ст}^2 + v_0^2/\omega_0^2},$$

$$\xi_д = \xi_{ст} + \xi_{max} = \xi_{ст}\,[1 + \sqrt{1 + v_0^2/(\omega_0^2\xi_{ст}^2)}\,].$$

Максимальное ускорение и коэффициент ударной перегрузки соответственно будут

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} = \omega_0^2\xi_{ст}\sqrt{1 + v_0^2/(\omega_0^2\xi_{ст}^2)}$$

и

$$k_{уд} = d^2\xi/dt^2\,\frac{1}{g}.$$

Расчеты на прочность конструктивных элементов

Механическую прочность элементов конструкции проверяют методами сопротивления материалов и теории упругости для простейших балочных конструкций (стержней), пластин, рам с сосредоточенной, распределенной и смешанной нагрузкой. В большинстве практических случаев конструкции деталей ЭА имеют более сложную конфигурацию, затрудняющую определение в них напряжений. При расчетах сложную деталь заменяют ее упрощенной моделью: балкой, пластиной, рамой.

К балкам относят тела призматической формы, длины которых значительно превышают все прочие геометрические размеры конструкции. Концы балок защемляются (сваркой, пайкой, винтовым соединением — при большом количестве винтов), опираются шарнирно-подвижно (установкой в направляющие) или шарнирно-неподвижно (одиночное винтовое соединение). Пластинами считают тела прямоугольной формы, толщина которых мала по сравнению с размерами основания. К подобным конструкциям относят печатные платы, стенки кожухов приборов, стоек, панелей и прочих подобных конструкций. Жесткое закрепление края пластин осуществляется пайкой, сваркой, зажимом, винтовым соединением; шарнирное закрепление — установкой пластин в направляющие, гнездовой соединитель, винтовым соединением. Рамными конструкциями моделируются многовыводные компоненты: МС, реле и пр.

Выражения для расчетов на прочность следующие:

- при растяжении (сжатии) $\sigma_{р.сж} = P/F \leqslant [\sigma]_{р.сж}$;
- при изгибе $\sigma_и = M_и/W_и \leqslant [\sigma]_и$;
- при срезе $\tau_{ср} = P/F \leqslant [\tau]_{ср}$;
- при кручении $\tau_{кр} = M_{кр}/W_{кр} \leqslant [\tau]_{кр}$,

где P — усилие, действующее на деталь, Н; F — площадь сечения детали, мм^2; $[\sigma]_{р.сж}$, $[\sigma]_{и}$ — допускаемые напряжения на растяжение, сжатие и изгиб; $[\tau]_{ср}$, $[\tau]_{кр}$ — допускаемые напряжения на срез и кручение; $M_{и}$, $M_{кр}$ — изгибающий и крутящий моменты, Н/мм; $W_{и}$, $W_{кр}$ — моменты сопротивления при изгибе и кручении, мм^3.

При проектировании конструкции выполняют:

- проверочные расчеты, когда форма и размеры детали известны (выявлены при конструировании) и определяются по вышеприведенным формулам напряжения в опасных сечениях;
- проектные расчеты, когда размеры опасных сечений неизвестны и их определяют на основе выбранных допустимых напряжений;
- расчеты допускаемых нагрузок по известным опасным сечениям и допустимым напряжениям.

При проведении проверочных расчетов на упругие колебания с учетом направления воздействия вибраций выделяют детали и узлы, имеющие наибольшие деформации, выбирают расчетные модели, рассчитывают собственные частоты, определяют нагрузки и сравнивают полученные значения с пределами прочности выбранных материалов, при необходимости принимают решение о повышении прочности конструкции.

Для увеличения вибропрочности в конструкции отдельных элементов вводятся дополнительные крепления, ребра и рельефы жесткости, отбортовки, выдавки, используются материалы с высокими демпфирующими свойствами, демпфирующие покрытия.

На рис. 4.3 и 4.4 приведены примеры плоских элементов конструкции с применением выдавок и отбортовки.

Внешние вибрационные воздействия часто задаются довольно узким диапазоном частот. В правильно сконструированной аппаратуре собственная частота f_0 конструкции не должна находиться в спектре частот внешних воздействий. Хотя любая конструкция обладает несколькими значениями собственных частот, однако расчет выполняется только для низших значений f_0,

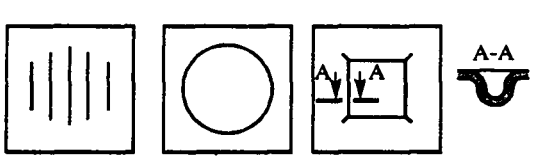


Рис. 4.3. Конфигурация выдавок тонкостенных конструкций деталей

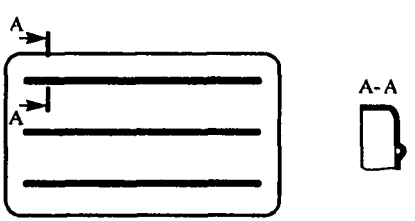


Рис. 4.4. Крышка прибора с тремя выдавками (рельефами жесткости) и отбортовкой по контуру

поскольку деформации конструкций в этом случае будут максимальными. Если низшее значение собственной частоты входит в диапазон внешних воздействий, то конструкцию дорабатывают с целью увеличения f_0 и выхода из спектра частот внешних воздействий.

Под *жесткостью* конструкции понимается способность системы (элемента, детали) противостоять действию внешних нагрузок с деформациями, не допускающими нарушение ее работоспособности. Количественно жесткость оценивается *коэффициентом жесткости* $\lambda = P/\delta$, где P — действующая сила; δ — максимальная деформация. Конструкцию, какой бы сложной она не была, можно представить в виде совокупности элементов (деталей), каждый из которых работает как балка определенной длины и сечения, закрепленная на одном или обоих концах. Известно, что жесткость защемленной на одном конце балки, находящейся под воздействием сосредоточенной нагрузки, вычисляется по выражению EF/l при работе балки на растяжение или сжатие и по выражению $3EJ/l^3$ при работе балки на изгиб (E — модуль упругости материала балки; F — площадь сечения; J — осевой момент инерции; l — длина балки). Можно говорить о жесткости материала, так как чем больше модуль упругости материала, тем выше жесткость балки, и о жесткости конструкции, зависящей от длины, формы и размеров поперечного сечения балки. Так же можно сказать, что жесткость балки на изгиб значительно ниже жесткости ее на растяжение или сжатие.

Сравнение жесткости через моменты инерции профилей двух балок (рис. 4.5) без ребра и с вертикальным ребром (соответственно J_a и $J_б$ относительно оси x—x) получим из соотношения

$$J_б / J_a = 1{,}5 b_0 h_0 (1 + 2h_0 + 1{,}66 h_0^2),$$

где $b_0 = b_p/b$; $h_0 = h/s$.

Например, при $b = 20$, $s = 2$, $h = 10$, $b_p = 1$ отношение $J_б/J_a \approx 20$, т. е. площадь сечения балки (расход материала) увеличилась в 1,25, а жесткость возросла приблизительно в 20 раз.

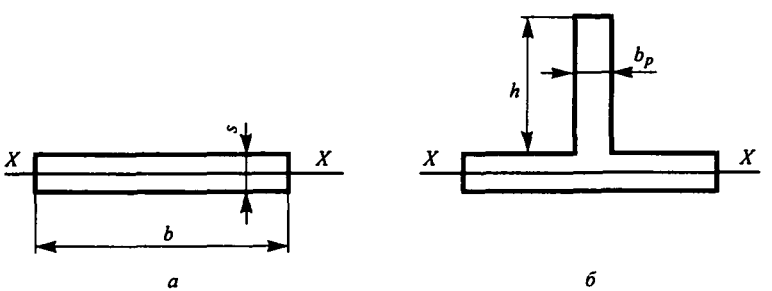


Рис. 4.5. Примеры сечений балок:
а — без вертикального ребра; *б* — с вертикальным ребром

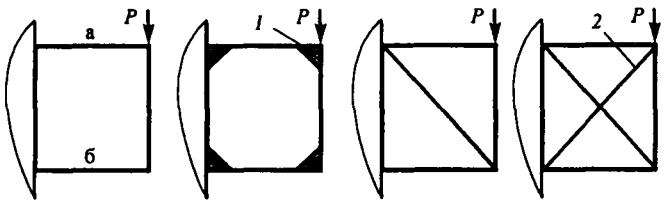


Рис. 4.6. Увеличение жесткости рамы введением косынок и диагональных элементов

На рис. 4.6 прямоугольная рама закреплена своей левой стороной. Под воздействием силы P элементы *а* и *б* рамы работают на изгиб. Повышение жесткости конструкции возможно введением косынок и диагональных элементов, работающих на растяжение и сжатие.

В табл. 4.1 приведены параметры материалов, применяющихся для конструкций ЭА. Удельная прочность и жесткость материалов рассчитывается по следующим выражениям:

- для металлов

$$\sigma_{\text{р}}^{\text{уд}} = [\sigma]_{\text{р}} / \rho; \quad \sigma_{\text{и}}^{\text{уд}} = [\sigma]_{\text{и}}^{2/3} / \rho; \quad E^{\text{уд}} = E / \rho;$$

- для неметаллов

$$\sigma_{\text{р}}^{\text{уд}} = [\sigma]_{\text{р}} / \rho; \quad \sigma_{\text{и}}^{\text{уд}} = [\sigma]_{\text{и}} / \rho,$$

где ρ — плотность вещества.

Пластмассы являются заменителями металлов в несущих конструкциях и играют значительную роль в обеспечении экономии черных и особенно цветных металлов. Характеристики некоторых конструкционных пластмасс и их применение в ЭА приведены в табл. 4.2.

Вибрации, направленные ортогонально к плоскости печатной платы, попеременно изгибают ее и влияют на механическую прочность установленных на ней микросхем и ЭРЭ (компонентов). Если компоненты считать жесткими, то изгибаться будут их выводы (рис. 4.7). Большинство отказов компонентов происходит из-за поломки паяных соединений выводов с платой, потери герметизации. Наиболее жесткие воздействия имеют место в центре платы, а для прямоугольных плат еще и при ориентации тела элемента вдоль короткой стороны платы.

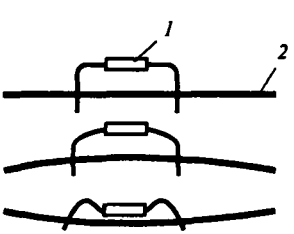


Рис. 4.7. Изменение формы выводов элементов при вибрациях печатной платы:

1 — элемент; *2* — печатная плата

Таблица 4.1. **Параметры конструкционных материалов**

Материал	Марка	$\sigma_р$, МПа	E, ГПа	ρ, г/см^2	Удельная прочность и жесткость		
					$\sigma_р^{уд}$	$\sigma_и^{уд}$	$E^{уд}$
Сталь углеродистая	Ст10	334	203	7,85	42,5	12	26
	Ст45	600	200	7,85	76,5	18	25,5
Сталь легированная	30ХГСА	490	198	7,85	62	15,7	25,3
Алюминиевые сплавы	АД-1	58	69	2,7	21	7,7	26
	В-95	275	69	2,8	96	21	24
Магниевые сплавы	МА2-1	255	40	1,8	142	27	23
	МА2-8	275	40	1,8	154	29	22
Медные сплавы	Л-63	294	103	8	35	11	12
	Бр-Б2	392	115	8	48	13	14
Титановые сплавы	ВТ1-0	687	113	4,5	152	28	25
	ВТ3-1	1176	113	4,5	218	41	25
Фенопласт	К-21-22	64	8,6	1,4	38	46	6,2
Пресс-материал	АГ-4С	245	34	1,8	273	136	19
Гетинакс	II	98	21	1,4	49	70	15
Текстолит	ПТК	157	10	1,4	70	112	7
Стеклотекстолит	ВФТ-С	245	—	1,85	180	132	—
Фторпласт	4А	14	0,44	2,2	10	6,2	0,2
Стеклопластик	СВАМ-ЭР	687	21	2	221	343	10,3
Пенопласт	ПС-1	—	0,15	0,35	14	—	0,45

Приклеивая компоненты к плате, в значительной степени улучшают надежность паяных соединений. Защитное лаковое покрытие толщиной 0,1...0,25 мм жестко фиксирует компоненты и увеличивает надежность ЭА.

Механические напряжения на паяные соединения от воздействия вибраций можно уменьшить:

- увеличением резонансных частот, что позволяет уменьшить прогиб платы (в выражении для расчета прогиба платы $y_0 = 254GQ/f_0^2$, мм собственная частота f_0 находится в знаменателе; G — внешнее воздействие; Q — добротность платы);
- увеличением диаметра контактных площадок, что повышает прочность сцепления контактной площадки с платой;
- подгибом и укладыванием выводов элементов на контактную площадку, что увеличивает длину и прочность сцепления паяного соединения (рис. 4.8);
- уменьшением добротности платы на резонансе ее демпфированием многослойным покрытием лака.

Таблица 4.2. **Характеристики конструкционных пластмасс**

Материал	Характеристика	Применение
Стеклопластик	Высокие прочностные свойства и износостойкость	Корпуса, воздуховоды, электроизоляционные детали
Фенопласты	Высокие диэлектрические свойства и механическая прочность	Кожухи, корпуса, крышки, электроизоляционные детали
Полиамиды	Высокие антифрикционные и электроизоляционные свойства, коррозионная и химическая стойкость	Подшипники, шестерни, вкладыши, втулки
Полистирол	Водостойкость	Емкости, крупногабаритные элементы конструкции
Фторпласты	Хим-, водо-, теплостойкость	Электроизоляционные детали, панели, щитки, корпуса приборов
Полиформальдегиды	Механическая прочность, тепло- и коррозионная стойкость	Подшипники, детали приборов точной механики
Пентопласты	Механическая прочность и теплостойкость	Подшипники, детали приборов, болты, гайки, шайбы

При расчетах на прочность электронные элементы приводятся к расчетным моделям рам, для которых задаются условия закрепления и определяются усилия отрыва и изгибающие моменты. Добротность печатной платы Q в первом приближении может быть оценена по выражению $Q = (0{,}5...2{,}0)\sqrt{f_0}$, где f_0 — низшая собственная частота печатной платы, Гц. При проектировании методом наихудшего случая, когда требуется определить наибольшие нагрузки и прогиб, численный коэффициент следует взять максимальным.

При вибрациях ПП прогибаются и при малых зазорах между платами, например в блоке, возможно их соударение и, как следствие, короткие

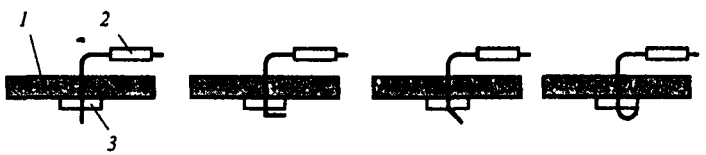


Рис. 4.8. Ориентация выводов элемента на поверхности контактной площадки:

1 — печатная плата; *2* — элемент; *3* — контактная площадка

Таблица 4.3. **Экспериментальные данные собственных частот ПП**

Размеры ПП, мм	35	70	140	Толщина ПП, мм
	Собственная частота, Гц			
25	2780	2070	2260	1,0
	5100	3800	3640	1,5
50	1400	690	520	1,0
	2600	1270	955	1,5
75	1120	450	265	1,0
	2030	830	490	1,5

замыкания между элементами, а затем их механическое разрушение. Минимальный шаг установки плат должен выбираться с учетом прогиба плат и превышать его максимально возможную величину.

В табл. 4.3 приведены экспериментальные данные по собственным частотам ПП в зависимости от их линейных размеров. Материал плат — стеклотекстолит, монтаж элементов — двусторонний, фиксация платы — по всему периметру. Чтобы собственные частоты превысили границы верхнего диапазона частот внешних воздействий, необходимо увеличивать толщину или уменьшать ширину (длину) платы.

Таблица 4.4. **Приведение реальной конструкции к расчетным моделям**

Направление вибраций вдоль оси	Позиция на рис. 4.9	Способ крепления	Расчетная схема	Нагрузка
Y	*9*	4 винта по углам	Шарнирно опертая равномерно нагруженная балка	Масса блока
	6	4 винта по контуру	Пластина, опертая по контуру	Масса пластины
	5	4 винта по углам	Шарнирно опертая равномерно нагруженная балка	Масса пластины и МС
Z	*1*	4 винта по углам	Шарнирно опертая равномерно нагруженная балка	Масса панели с соединителями
	4	По периметру винтами	Пластина, опертая по контуру	Масса крышки
	Узел	Винтовое соединение	Рама	Масса плат и МС
X	*8*	По периметру винтами	Пластина, опертая по контуру	Масса пластины
	Узел	Винтовое соединение	Рама	Масса плат и МС

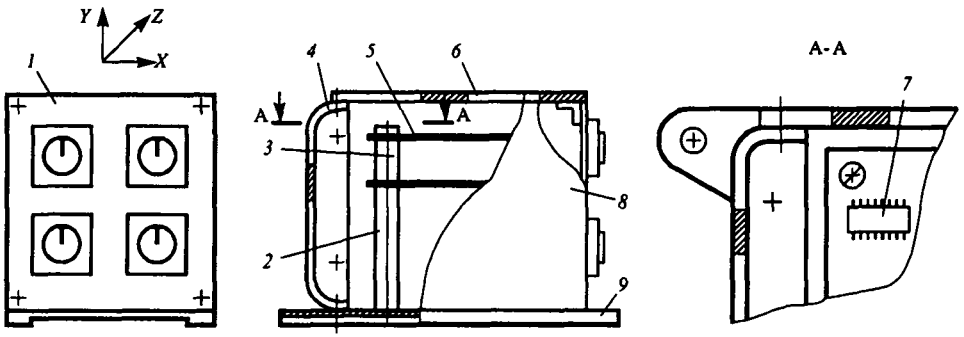


Рис. 4.9. Конструкция блока:

1 — панель соединителей; *2, 3* — стойки; *4* — задняя крышка; *5* — плата; *6* — верхняя крышка; *7* — микросхема; *8* — боковая крышка; *9* — основание

На примере блока бортовой аппаратуры (рис. 4.9) показаны результаты преобразования деталей и узлов конструкции в расчетные модели (табл. 4.4).

Для проведения собственно расчетов необходимо знать диапазон частот внешних воздействий, виброперегрузки, ориентированные в трех взаимно ортогональных направлениях, размеры и материалы деталей конструкции. Для вибраций, перпендикулярных плоскости основания (вдоль оси *Y*), наименьшую жесткость имеют детали *5*, *6*, *9*; для вибраций, направленных вдоль осей соединителей (оси *Z*) — детали *1*, *4* и сборочный узел из двух печатных плат на стойках *2*, *3*; для вибраций вдоль оси *X* — деталь *8* и сборочный узел.

Фиксация крепежных элементов

При воздействии вибраций возможно отвинчивание крепежных элементов, для предотвращения которого вводят фиксаторы, увеличивают силы трения, устанавливают крепеж на краску и пр. При выборе методов фиксации крепежных элементов должны учитываться следующие соображения:

- обеспечение прочности соединения при заданных нагрузках и климатических воздействий;
- быстрота выполнения соединения, его стоимость;
- последствия, к которым приведет отказ соединения;
- срок службы.

При выборе крепежных элементов следует принимать во внимание возможность замены износившихся или поврежденных деталей, использовать вместо винтовых пар быстро сочленяемые элементы: петли, защелки, собачки и пр. Болты должны быть ориентированы головкой вверх, чтобы

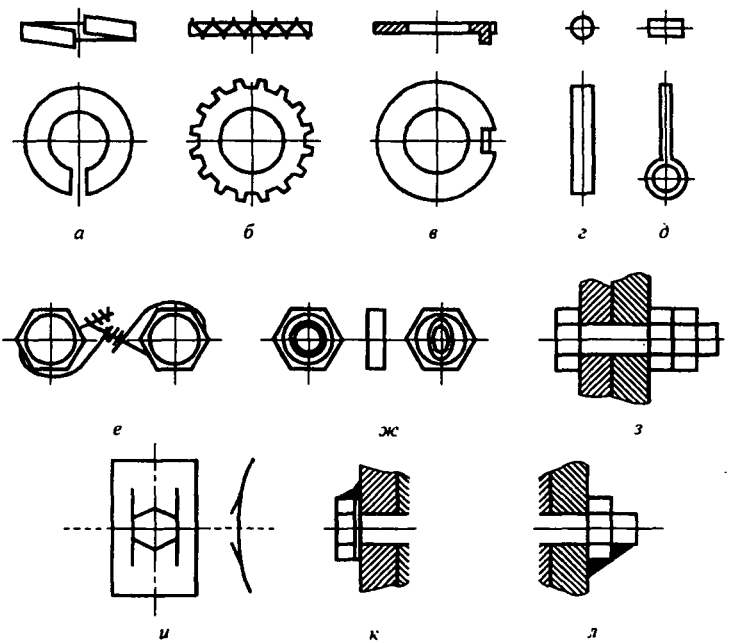


Рис. 4.10. Элементы фиксации и способы фиксации крепежных элементов

при отвинчивании гайки болты оказывались на установочном месте. Рекомендуется применять несколько больших крепежных деталей вместо большого числа маленьких. Число оборотов, необходимых для затягивания или отпускания винта, должно быть не менее 10.

На рис. 4.10 приведены различные способы фиксации крепежных элементов. Пружинная шайба (рис. 4.10, *а*) фиксирует гайку или головку винта и устанавливается между гайкой или головкой винта и поверхностью соединяемой детали. Для предохранения от соскабливания покрытий соединяемых деталей острой режущей частью пружинной шайбы между ней и поверхностью детали устанавливается плоская шайба. На рис. 4.10, *б* показана разновидность пружинной шайбы — зубчатая пружинная шайба. Зубцы шайбы ориентируются по внешней или внутренней поверхности. В первом случае детали фиксируются надежно, не вызывая повреждение поверхности тела винта. После затягивания гайки участок стопорной шайбы, противоположный стопору (см. рис. 4.10, *в*), отгибают, прижимая его к поверхности гайки. В отверстие, просверленное после затягивания гайки, устанавливают штифт (см. рис. 4.10, *г*). Корончатая (прорезная) гайка фиксируется шплинтом (см. рис. 4.10, *д*), проходящим через отверстие в теле болта. В головках болтов просверливаются отверстия, через которые протягивается и закручивается страховочная проволока (см. рис. 4.10, *е*). Гайка с деформированной резьбой в верхней своей части при

затягивании фиксируется трением на резьбе болта (нижняя часть гайки имеет цилиндрическое отверстие и нормальную резьбу — см. рис. 4.10, *ж*). На рис. 4.10, *з* показана фиксация болта двумя гайками. Условие надежной фиксации: нижняя гайка должна плотно прилегать к контргайке. На рис. 4.10, *и* приведен перфорированный элемент, действующий как самоконтрящаяся гайка. На рис. 4.10, *к* и 4.10, *л* показаны примеры установки крепежных элементов на краску (головка винта и шайба, болт и гайка фиксируются краской).

Расчет срока службы конструкции

При колебаниях в конструкциях возникают переменные напряжения и конструкции могут разрушаться при нагрузках, значительно меньших предельной статической прочности материалов из-за появления микротрещин, на рост которых влияют особенности кристаллической структуры материалов, концентрации напряжений в углах микротрещин, условий окружающей среды. По мере развития микротрещин поперечное сечение детали ослабляется и в некоторый момент достигает критической величины — конструкция разрушается.

Если масса изделия не является критическим фактором, то конструкцию упрочняют, используя материалы с запасом, избегают введения отверстий, надсечек, сварных швов, ведут расчеты конструкций методом наихудшего случая.

Срок службы конструкции при вибровоздействиях определяется числом циклов до разрушения, которое может выдержать конструкция при заданном уровне механической нагрузки и внешних условиях. Усталостные характеристики материалов выявляются на группе образцов при знакопеременной повторяющейся нагрузке σ как функции от числа циклов n (рис. 4.11).

При определении срока службы вычисляются собственные частоты и динамические напряжения в конструкции. Затем по усталостной характеристике материала для найденного значения динамического напряжения находят число циклов до разрушения и срок службы.

Пример. Определить срок службы теплоотвода из алюминиевого сплава массой 30 г, на котором установлены 4 диода мостовой выпрямительной схемы вторичного источника питания общей массой 60 г (рис. 4.12). Конструкция подвергается вибрационным нагрузкам ортогонально установочной плоскости диодов с перегрузкой $K_g = 10$. Для алюминиевого сплава модуль упругости $E = 68{,}7 \cdot 10^9$ Н/м.

Резонансную частоту теплоотвода для равномерно распределенной нагрузки можно определить по формуле

$$f_0 = 0{,}5\sqrt{\frac{Ejg / P_p^*}{l^2}}.$$

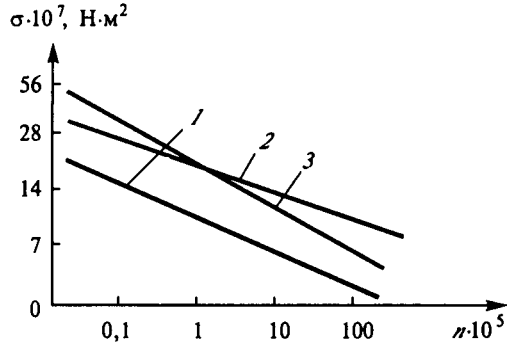


Рис. 4.11. Усталостные характеристики:
1 — алюминиевый сплав; *2* — стеклотекстолит; *3* — выводы элементов

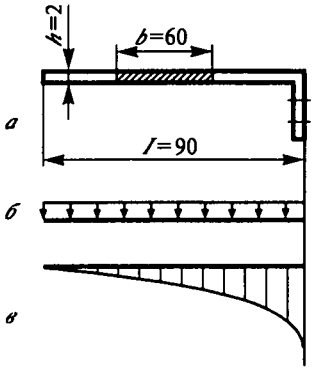


Рис. 4.12. Расчетная схема теплоотвода:
а — теплоотвод; *б* — нагрузка; *в* — эпюра моментов

Общая масса конструкции включает массу пластины и диодов и составляет 90 г. Нагрузка на теплоотвод

$$P_p^* = mK_g g/l = 0{,}09 \cdot 10 \cdot 9{,}81/0{,}09 = 98{,}1 \text{ Н/м};$$

момент инерции сечения

$$j = bh^3/12 = 0{,}06(2 \cdot 10^{-3})^3/12 = 0{,}04 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4;$$

собственная частота теплоотвода

$$f_0 = 0{,}5\sqrt{68{,}7 \cdot 10^9 \cdot 0{,}04 \cdot 10^{-9} \cdot 9{,}81/98{,}1/0{,}09^2} = 36{,}5 \text{ Гц}.$$

Для определения динамической нагрузки на резонансе необходимо знать добротность системы, которую определим по приближенной формуле

$$Q = 1{,}25\sqrt{f_0} = 7{,}55.$$

Динамическая нагрузка на теплоотвод определяется из выражения

$$P_д = QP_p^* = 741 \text{ Н/м},$$

а изгибающее напряжение

$$\sigma = P_д l^2(h/2)/(2bh^3/12) = 3P_д l^2/(bh^2) \approx 7 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2.$$

Таким образом, конструкция выдержит до разрушения около 10^6 циклов, что соответствует сроку службы $t = \dfrac{10^6}{36{,}5}\left(\dfrac{\text{циклы}}{\text{Гц}}\right)$ или более трех часов непрерывной работы.

Конструкционные материалы

Конструкционный материал должен удовлетворять заданными механическими и физическими свойствами, обладать легкостью в обработке, коррозионной стойкостью, низкой стоимостью, иметь максимальное отношение прочности к массе и пр.

Как говорилось выше, основой любой ЭА является несущая конструкция (НК), обеспечивающая его конструктивную целостность и защиту от механических воздействий. В зависимости от сложности НК выполняют в виде единой детали либо составной, включающей несколько деталей, объединенных в единую конструкцию разъемными или неразъемными соединениями.

Основное назначение конструкционных материалов — нести нагрузку, передавать усилия, скреплять, удерживать, предохранять от разрушений. Задача конструктора — выбрать из доступных материалов такие, которые в наилучшей степени удовлетворяют конструктивным требованиям.

Минимизация массы — важнейшее условие конструирования переносной, передвижной и бортовой ЭА. Снижение массы аппаратуры позволяет уменьшить габариты, расходы материалов, затраты на производство и эксплуатацию, себестоимость изделий.

В микроминиатюрной аппаратуре масса несущих конструкций достигает 70 % от общей массы ЭА. Основной путь к снижению массы изделий — облегчение несущих конструкций при одновременном обеспечении ими требований прочности и жесткости. Для этого необходимо:

- из нескольких возможных вариантов НК выделять решения, позволяющие получить минимум массы конструкции;
- выбирать материалы деталей с учетом удельной прочности и жесткости, используя легкие сплавы и неметаллы;
- придавать деталям равную прочность в каждом сечении;
- вводить отверстия, выемки, проточки, удаляя из деталей материал, не несущий нагрузку;
- вводить ребра жесткости, отбортовки, выдавки.

4.2. Защита ЭА от воздействия влажности

От прямого воздействия влаги ЭА, как правило, не защищена и не должна эксплуатироваться в этих условиях. Однако на работающую аппаратуру воздействуют пары влаги окружающего воздуха или какой-либо иной газовой среды, в которой эксплуатируется аппаратура. В техническом задании на разработку всегда указывается относительная влажность воздуха. Нормальной влажностью считается относительная влажность 60...75 % при температуре 20...25 °С.

Возможна конденсация водяных паров на холодных поверхностях конструкции как внутри аппаратуры, так и снаружи. Выпадение росы (конденсация) вызывается понижением температуры, которое практически всегда имеет место при отключении и последующем хранении аппаратуры. Например, если в течение дня влажность внутри ЭА составляла 70, 50 и 35 %, то точка росы оказывается соответственно на 5, 10 и 15 °С ниже температур, которые имели место днем внутри ЭА.

Интенсивное нагревание переохлажденной аппаратуры перед приведением ее в рабочее состояние также приводит к конденсации влаги на холодных элементах конструкции. В результате движения потоков воздуха влага будет осаждаться на одних и тех же местах. Капли конденсата будут стекаться в поддон конструкции и собираться в местах «ловушек влаги». В результате аппаратура будет находиться под постоянным воздействием влаги.

При длительном воздействии высокой влажности металлические конструкции подвергаются коррозии, органические материалы — набуханию и гидролизу. Продуктом гидролиза являются органические кислоты, разрушающие органические материалы и вызывающие интенсивную коррозию металлических несущих конструкций. Наличие во влажной атмосфере промышленных газов и пыли приводит к прогрессирующей коррозии. В результате создания благоприятных условий для образования плесени воздействие влаги может многократно усилиться.

Хотя параметры аппаратуры при этом не изменяются, однако коррозия недопустима, поскольку ухудшает внешний вид изделия, а с течением времени рыхлая окисная пленка может оказаться в гнездовых контактах соединителей, что приводит к трудно устранимым отказам.

Существенно влияние влажности на электрические соединения. При повышенной влажности корродируют проводники, на разъемных контактах появляются налеты, ухудшающие их качество, отказывают паяные соединения, особенно если они загрязнены.

Слоистые диэлектрики, поглощая влагу, меняют параметры и характеристики. Образование на печатных платах водяной пленки приводит к снижению сопротивления изоляции диэлектриков, появлению токов утечки, электрическим пробоям, механическим разрушениям (поломкам, разрывам, заклиниванию) вследствие набухания-высыхания материала. Из-за поглощения влаги значительно уменьшается электрическая прочность, что особенно сказывается на работоспособности высоковольтных узлов, вызывая их возгорание. Влажность ускоряет разрушение лакокрасочных покрытий, нарушает герметизацию и целостность заливки элементов влагозащитными материалами. За 3—4 года эксплуатации при относительной влажности ниже 20 % и температуре +30 °С полностью высыхает изоляция проводов, в результате чего она становится ломкой, меняет свойства.

Защита аппаратуры от воздействия влажности осуществляется соответствующими материалами, покрытиями, применением усиленной вентиляции сухим воздухом, поддерживанием внутри изделий более высокой температуры, чем температура окружающей среды, использованием поглотителей влаги, разработкой герметичной аппаратуры.

Даже в относительно несложных конструкциях ЭА используются различные материалы. Коррозия протекает более интенсивно при контактировании материалов с существенно различными электрохимическими потенциалами. Металл с отрицательным потенциалом гальванической пары будет разрушаться и тем быстрее, чем больше разница их электрохимических потенциалов. Электрохимические потенциалы металлов в пресной и морской воде представлены в табл. 4.5.

Таблица 4.5. **Электрохимические потенциалы металлов**

Пресная вода		Морская вода	
Металл	Потенциал, мВ	Металл	Потенциал, мВ
Серебро	+194	Серебро	+149
Медь	+140	Никель	+46
Никель	+118	Медь	+10
Алюминий	–169	Свинец	–259
Олово	–175	Цинк	–284
Свинец	–283	Сталь	–335
Сталь	–350	Кадмий	–519
Кадмий	–574	Алюминий	–667
Цинк	–823	Олово	–809

Если по тем или иным причинам невозможно заменить металлы с высокой разницей электрохимических потенциалов, то на них наносятся *защитные покрытия*. Применяются *металлические, химические* и *лакокрасочные* покрытия.

Металлические покрытия образуют с основным материалом детали контактную пару. В зависимости от полярности потенциала различают покрытия анодные (отрицательный потенциал покрытия по отношению к основному металлу) и катодные (положительный потенциал покрытия). При коррозии может разрушаться как основной металл детали, так и покрытие. Разрушение происходит из-за наличия пор в покрытиях, повреждений в виде сколов, царапин, трещин, возникающих в процессе эксплуатации, и будут тем интенсивнее, чем больше разница электрохимических потенциалов между основным металлом и покрытием. При анодном покрытии вследствие коррозии разрушается само покрытие, основной материал детали не подвергается разрушению. При катодном покрытии все происходит наоборот.

В качестве материалов покрытий наибольшее распространение получили никель, медь, цинк, кадмий, олово и серебро. Толщина покрытия выбирается в зависимости от материала и способа нанесения покрытия. Для улучшения механических и защитных свойств покрытий рекомендуются к применению многослойные покрытия из разнородных материалов.

Полученное химическим способом покрытие менее прочно, чем покрытие металлическое. Образующаяся при этом защитная пленка химически пассивна, устойчива, имеет хороший декоративный вид. Толщина покрытия обычно равна от 1...15 мкм.

Оксидирование — получение окисной пленки на стали, алюминии и его сплавах. Такое покрытие имеет хороший внешний вид, антикоррозионные свойства, но непрочно и микропористо. Последнее свойство покрытия позволяет его использовать как грунт под окраску.

Анодирование — декоративное покрытие алюминия и его сплавов электрохимическим способом. Защитная пленка химически устойчива, обладает высокими электроизоляционными свойствами, надежно защищает от коррозии, может быть окрашена.

Фосфатирование — процесс образования на стали защитной пленки с высокими антикоррозионными и электроизоляционными свойствами, хорошей адгезией. Получаемое покрытие пористо и недостаточно прочно. Фосфатные пленки используются как грунт под окраску.

Лакокрасочные покрытия защищают детали от коррозии. Как недостаток следует отметить низкую механическую прочность и термостойкость. Этот вид покрытия применяется для окрашивания каркасов, кожухов, лицевых панелей приборов и т. п. Качественный внешний вид изделия обеспечивается многослойным окрашиванием. Толщина лакокрасочного покрытия колеблется от 20 до 200 мкм. В табл. 4.6 приведены группы лакокрасочных покрытий и виды воздействий, которым они противостоят.

Таблица 4.6. **Группы лакокрасочных покрытий**

Группа покрытий	Виды внешних воздействий
Водостойкие	Морская, пресная вода и ее пары
Специальные	Облучение, глубокий холод, открытое пламя, биологическое воздействие и пр.
Маслобензостойкие	Минеральные масла и смазки, бензин, керосин
Химически стойкие	Различные химические реагенты; агрессивные газы, пары и жидкости; растворы кислот и солей
Термостойкие	Температура выше +60 °С
Электроизоляционные	Электрический ток, коронные и поверхностные разряды

Лаковое покрытие толщиной 80...130 мкм защищает плату с компонентами от влажности. Недостатком лаковых покрытий является то, что они требуют высокой чистоты производственных процессов и усложняют замену неисправных компонентов. При эксплуатации покрытия скалываются, ломаются, шелушатся и загрязняют контакты электрических соединителей. Пары воды, попадая под покрытия, конденсируются и уменьшают электрическое сопротивление между разобщенными цепями. При высыхании покрытия образующиеся мосты из лака между рядом расположенными выводами компонентов передают механические напряжения на выводы и паяные соединения, вызывая короткие замыкания между рядом расположенными выводами, увеличивая вероятность отказа паяных контактов.

4.3. Защита от воздействия пыли

Пыль — смесь твердых частиц малой массы, находящаяся в воздухе во взвешенном состоянии или медленно оседающая на поверхность предметов. Различают пыль *естественную*, образованную на поверхности Земли под влиянием Солнца, вулканов и т. д., и *техническую*, которая является следствием износа оборудования, обработки материалов, сжигания топлива и пр.

При относительной влажности воздуха выше 75 % и нормальной температуре наблюдается рост числа частиц пыли, их коагуляция, увеличивается вероятность притяжения пыли к неподвижным поверхностям. При низкой влажности частицы пыли электрически заряжаются. Как правило, неметаллическая пыль заряжается положительно, металлическая — отрицательно. Заряд частиц чаще всего возникает из-за трения.

Загрязненность воздуха пылью значительно снижает бесперебойную и надежную работу ЭА. Пыль, попадая в смазочные материалы и прилипая к скользящим поверхностям деталей электромеханических узлов, приводит к ускоренному их износу. Максимальную опасность представляют частицы величиной 1...40 мкм.

Под воздействием пыли изменяются параметры и характеристики магнитных лент, дискет, магнитных головок, царапается и приходит в негодность магнитный слой. Пыль в зазорах контактов препятствует замыканию контактов реле. Эти отказы контактов возникают из-за частиц пыли размером более 50 мкм. При частом переключении реле срабатывает эффект самоочистки контактов при их искрении.

Оседающая на поверхности некоторых металлов пыль опасна из-за своей гигроскопичности, поскольку уже при относительно небольшой влажности пыль существенно повышает скорость коррозии. Пыль, имеющая

в своем составе электролит, поглощает влагу из воздуха, многократно усиливая коррозию. Пыль с поглощенными ею растворами кислот разрушает достаточно быстро даже очень хорошие краски. В тропических странах пыль часто является причиной роста плесени.

Слежавшаяся в процессе длительной эксплуатации на поверхности компонентов пыль снижает сопротивление изоляции, особенно в условиях повышенной влажности, приводит к появлению токов утечек между выводами, что очень опасно для микросхем с малыми расстояниями между выводами корпусов. Диэлектрическая проницаемость пыли выше диэлектрической проницаемости воздуха, что определяет завышение емкости между выводами компонентов и, как следствие, увеличение емкостных помех.

Оседающая в изделии пыль препятствует естественному движению воздуха, снижает эффективность охлаждения изделия, образует на поверхностях ПП, не защищенных лаковым покрытием, токопроводящие перемычки между проводниками.

Пыленепроницаемость ЭА или отдельных ее устройств может быть достигнута установкой их в герметичные корпуса (см. ниже). Однако при этом возрастает стоимость ЭА, ухудшается температурный режим работы. Если корпус ЭА выполнен с перфорациями, пыль вместе с охлаждающим воздухом проникнет внутрь ЭА естественным путем, либо при принудительном воздушном охлаждении — вместе с воздушными потоками от вентиляторов. Таким образом, применение корпуса с вентиляционными отверстиями для охлаждающего воздуха приводит к проникновению внутрь изделия пыли. Уменьшить попадание пыли внутрь ЭА возможно установкой на вентиляционные отверстия мелкоячеечных сеток, созданием внутри помещений, где эксплуатируется ЭА, соответствующей чистоты воздуха.

Влажность воздуха играет большую роль в борьбе с негативным влиянием воздействия пыли. С повышением относительной влажности выше 70 % пыль коагулирует, не поднимается слабыми движениями потоков воздуха и не прилипает на элементы конструкции. Поэтому рекомендуется регулярное влажное протирание полов в залах вычислительных центров, при этом моющие средства не должны выделять паров, которые могут вызывать коррозию металлов.

Для устранения проникновения загрязненного воздуха из других помещений в машинных залах вычислительных центров создается избыточное давление в 1...1,5 мм рт. ст. Используемые в помещениях строительные, отделочные, шумопоглощающие и изоляционные материалы не должны создавать пыль. Для предотвращения попадания в помещения запыленного воздуха с улицы оконные проемы должны быть герметичными.

4.4. Герметизация ЭА

Герметизация узлов, блоков и шкафов ЭА является надежным средством защиты от воздействия влажности и вредных веществ окружающей среды, пыли, изменения барометрического давления. Хотя МС и ЭРЭ поставляются герметичными, но часто в процессе эксплуатации внутрь корпусов компонентов проникает влага, изменяя свойства материалов, вызывая короткие замыкания.

Модули первого уровня защищают покрытием лаком, заливкой эпоксидной смолой, пропиткой, особенно моточных изделий, опрессовкой герметизирующими компаундами. *Компаундом* называется композиция на основе органических (смол, битумов, масел) или неорганических (алюмофосфатов, металлометафосфатов) веществ. Герметизация компаундами улучшает электроизоляционные и механические характеристики модуля. Однако низкая теплопроводность большинства компаундов ухудшает отвод теплоты, ограничивает или делает невозможным ремонт, внутренние напряжения могут нарушить целостность деталей и электрических соединений.

Полная герметизация блоков и шкафов путем помещения в герметичный кожух является самым эффективным способом защиты, но и самым дорогим. При этом возникает необходимость в разработке специальных корпусов, прокладок, способов герметизации внешних электрических соединителей, выходов жгутов, элементов управления и индикации. В условиях вакуума стенки герметизируемых изделий должны противостоять значительным усилиям из-за разницы давлений внутри и снаружи изделия. В результате увеличения жесткости конструкции возрастает ее масса и размеры. Применение полной герметизации может потребовать введения в конструкцию клапана-регулятора для снижения давления внутри корпуса.

Существует большое разнообразие способов герметизации. Широко применяются упругие уплотнительные прокладки, устанавливаемые между крышкой и корпусом (рис. 4.13). При поджатии они уплотняют стык корпуса с крышкой. Утечка газа через уплотнение при сжатии прокладки на 25...30 % от ее первоначальной высоты происходит только за счет диффузии. Большие усилия при сжатии не рекомендуются, поскольку из-за интенсивного старения прокладка быстро выходит из строя. Форма поперечного сечения прокладки может быть различной. Прямоугольные прокладки просты в изготовлении, легки в использовании, способны обеспечить воздушную герметизацию габаритных изделий, но не защищают их от воздействий водяных паров. Давление между крышкой и корпусом получается низким, поскольку прокладка легко деформируется под воздействием стяжных винтов *3*.

В качестве материала прокладок используют резину, обладающую высокой эластичностью, податливостью и способностью проникать в мель-

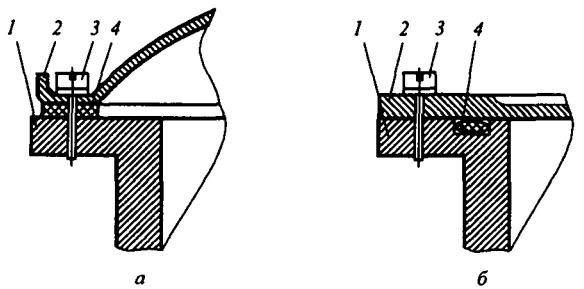


Рис. 4.13. Герметизация упругой (резиновой) прокладкой:
1 — корпус; *2* — крышка; *3* — винт; *4* — прокладка

чайшие углубления и неровности. Большие крышки требуют высокой жесткости и большого числа стяжных винтов с мелкой резьбой и для надежной герметизации изготавливаются на токарных станках.

Влага со временем проникает через все органические материалы, поэтому изделия с прокладками из органических материалов обеспечивают защиту от водяных паров лишь на протяжении нескольких недель.

При эксплуатации аппаратуры в условиях сверхнизкого вакуума, больших давлений, высоких температур органические материалы применять запрещается, рекомендуется использовать металлы, керамику, стекло. Необходимо помнить, что источниками влаги могут оказаться литые конструкции и конструкции, полученные экструзией, из-за пористости их поверхности. В порах скапливается влага, грязь, жиры и проникают в герметизируемые объемы. Чтобы этого не происходило, подобные конструкции в вакууме пропитывают эпоксидной смолой.

Если температура внутри герметизируемых изделий ниже температуры окружающей среды, то при высокой влажности внутри изделия влага будет конденсироваться, вызывая отказы. Вертикальной ориентацией плат и электрических соединителей обеспечиваются естественные пути отвода влаги в поддон изделия. Чтобы с конструкции легко скатывалась влага, поверхность ее должна быть гладкой. Избежать ловушек влаги, например, в углах несущих конструкций, где горизонтально ориентированные элементы конструкции сочленяются с вертикальными, можно выполнением отверстий диаметром 5...7 мм. Влага из поддона сливается, либо испаряется.

Постоянства относительной влажности в определенных пределах внутри герметичного аппарата можно добиться введением внутрь изделия веществ, активно поглощающих влагу. Подобными веществами являются силикагель, хлористый кальций, фосфорный ангидрид. Однако они впитывают влагу до определенного предела. Например, силикагель поглощает

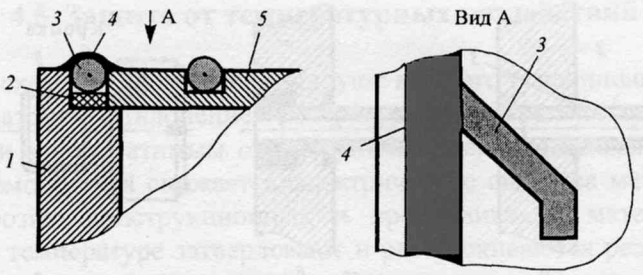


Рис. 4.14. Герметизация паяным швом и проволокой:
1 — корпус; *2* — прокладка; *3* — проволока; *4* — припой; *5* — крышка

около 10 % влаги от своей сухой массы. При этом относительная влажность внутри аппаратуры не превышает 80 %.

В особых случаях в качестве материалов прокладок применяют медь и нержавеющую сталь с алюминиевым или индиевым покрытием. Такие прокладки чаще всего выполняются трубчатыми с внешним диаметром 2—3 мм при толщине стенок 0,1…0,15 мм. Усилие поджатия при герметизации металлическими прокладками составляет 20…30 кг на 1см длины прокладки. Желобок в крышке и корпусе изделия в поперечном сечении должен быть в форме эллипса. При расчете герметизации определяется усилие поджатия прокладки, затем вычисляются усилия затягивания и количество стяжных винтов.

При жестких требованиях к герметичности герметизацию выполняют сваркой или пайкой (рис. 4.14) по всему периметру корпуса. Конструкция корпуса изделия должна допускать неоднократное выполнение операций разгерметизации/герметизации. В углубление корпуса *1* устанавливается прокладка *2* из жаростойкой резины, на которую укладывается стальная луженая проволока *3*. Проволока по контуру изделия припаивается к корпусу, образуя шов. Свободный конец проволоки в виде отвода фиксируется в пазу на крышке *5*. При разгерметизации изделия шов нагревают и припой вместе с проволокой легко удаляется. Повторную герметизацию можно осуществлять многократно. Резиновая прокладка предохраняет изделие от перегрева при пайке шва. Ширина прокладки на 0,2…0,3 мм больше ширины зазора между крышкой и корпусом. Диаметр проволоки должен быть меньше ширины зазора между крышкой и корпусом на 0,1…0,2 мм.

При герметизации внутренний объем герметизируемой аппаратуры заполняется инертным газом (аргоном или азотом) с небольшим избыточным давлением. Поскольку атмосфера земли в большинстве своем содержит азот, то при заполнении герметизируемого изделия сухим азотом свойства газа внутри изделия будут практически подобны свойствам воздуха. Закачка газа внутрь корпуса осуществляется через клапаны-трубки.

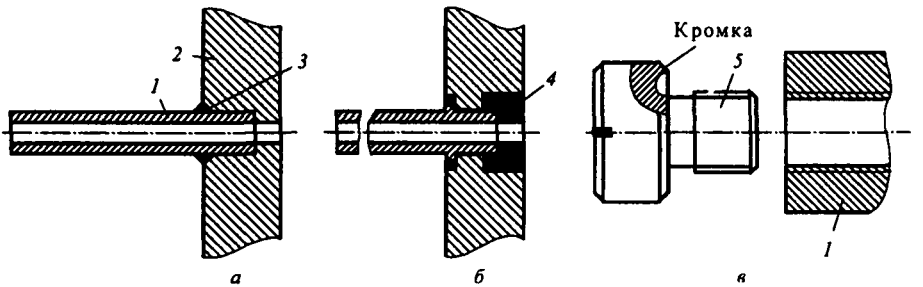


Рис. 4.15. Трубки-клапаны откачки воздуха:

1 — трубка-клапан; *2* — корпус; *3* — сварной шов; *4* — компаунд; *5* — винт

Входные и выходные клапаны–трубки следует размещать на противоположных сторонах корпуса. Продувка азотом обеспечивает очистку полости корпуса от водяных паров. Клапаны–трубки привариваются к корпусу или заливаются компаундом (рис. 4.15, *а*, *б*), затем защемляются. Защемленная часть трубки при разгерметизации изделия срезается и при необходимости повторно защемляется. Более удобна герметизация винтом *5* с острой кромкой, врезающейся при заворачивании в мягкий материал трубки–клапана (рис. 4.15, *в*).

Элементы управления и индикации герметизируются резиновыми чехлами, мембранами, электрические соединители — установкой на прокладки (рис. 4.16, *а*), заливкой компаундами (рис. 4.16, *б*), выходы жгутов — резиновыми зажимными шайбами (рис. 4.16, *в*).

Выбор способа герметизации определяется условиями эксплуатации, применяемыми материалами и покрытиями, требованиями к электрическому монтажу. Окончательное решение о выборе способа герметизации принимается после проведения натурных испытаний ЭА в камерах влажности.

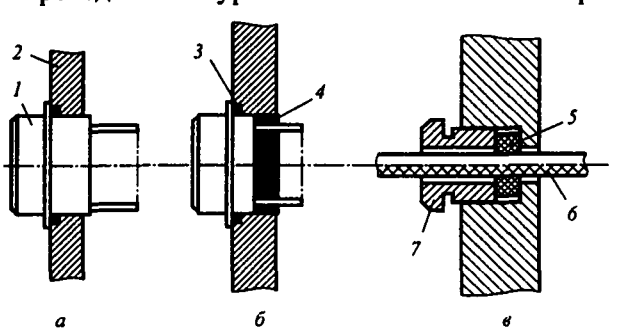


Рис. 4.16. Герметизация соединителя (*а*, *б*) и выхода жгута (*в*):

1 — соединитель; *2* — корпус; *3* — прокладка; *4* — компаунд; *5* — зажимная шайба; *6* — жгут; *7* — втулка

4.5. Защита от температурных воздействий

Микросхемы и ЭРЭ функционируют в строго ограниченных температурных диапазонах. Отклонение температуры от указанных диапазонов может привести к необратимым структурным изменениям компонентов. Повышенная температура снижает диэлектрические свойства материалов, ускоряет коррозию конструкционных и проводниковых материалов. При пониженной температуре затвердевают и растрескиваются резиновые детали, повышается хрупкость материалов. Различия в коэффициентах линейного расширения материалов могут привести к разрушению залитых компаундами конструкций и, как следствие, нарушению электрических соединений, изменению характера посадок, ослаблению креплений и т. п.

Нормальным температурным режимом называется режим, который при изменении в определенных пределах внешних температурных воздействий обеспечивает изменение параметров и характеристик конструкции, компонентов, материалов в пределах, указанных в технических условиях на них. Высокая надежность и длительный срок службы изделия будут гарантированы, если температура среды внутри ЭА является нормальной и равной 20...25 °С. При этом следует помнить, что изменение температуры относительно нормальной внутри ЭА на каждые 10 °С в любую сторону уменьшает срок службы аппаратуры приблизительно в 2 раза. Обеспечение нормального теплового режима приводит к усложнению конструкции, увеличению габаритов и массы, введению дополнительного оборудования, затратам электрической энергии.

Задача обеспечения работоспособности при низких температурах решается нагревом в продолжении некоторого времени помещения с одновременным включением аппаратуры для подогрева. При достижении внутри изделия нормальной температуры приступают к его эксплуатации. Далее из-за саморазогрева температура внутри изделия будет повышаться и может возникнуть необходимость в его охлаждении. Нагрев удобнее проводить электрическими нагревательными элементами, устанавливаемыми для стационарной аппаратуры в помещении, а для транспортируемой — встраиваемой в конструкцию. Температура контролируется либо при помощи термометров, размещаемых в ЭА в удобных для наблюдения местах, либо автоматически с выключением нагревателей после прогрева аппаратуры. При интенсивном нагреве холодного воздуха внутри прибора пары воды конденсируются на еще холодных поверхностях конструкции до тех пор, пока не осядет вся избыточная влага воздуха. Дальнейший нагрев приведет к нагреванию конструкции и испарению влаги. Конденсация оказывается невозможной, если нагрев происходит медленно.

Чаще всего конструктор решает задачу удаления избытка теплоты в результате саморазогрева аппаратуры. Как известно, передача теплоты от нагретой аппаратуры в окружающую среду осуществляется *кондукцией*, *конвекцией* и *излучением*.

Теплоотвод кондукцией

С увеличением плотности компоновки ЭА большая доля теплоты удаляется кондукцией. Для улучшения условий отвода теплоты от тепловыделяющих элементов в конструкции применяют тепловые разъемы, теплоотводящие шины, печатные платы на металлической основе и т. д. Количество теплоты $Q_к$ (кал/с), передаваемое в статическом режиме кондукцией, определяется по выражению

$$Q_к = \alpha_m \frac{S}{l} \Delta t, \tag{4.5}$$

где α_m — коэффициент теплопроводности, кал/(с · см · °С); S — площадь, через которую проходит тепловой поток, см^2; l — длина пути передачи теплоты, см; Δt — разность температур между охлаждаемой конструкцией и окружающей средой, °С.

Выражение (4.5) можно представить как $Q_к = G\Delta t$, где $G = \alpha_m \frac{S}{l}$ — *тепловая проводимость*. Величина, обратная тепловой проводимости, называется *тепловым сопротивлением*

$$R = \frac{1}{G} = \frac{l}{\alpha_m S}. \tag{4.6}$$

Коэффициенты теплопроводности некоторых конструкционных материалов приведены в табл. 4.7.

Для несложных по форме конструкций деталей, например, в виде цилиндра с подводом и отводом теплоты от торцевых поверхностей, найти тепловые сопротивления просто. Однако реальные конструкции деталей имеют достаточно сложную форму и это затрудняет определение их тепловых сопротивлений. Можно рекомендовать следующий способ получения тепловых моделей:

- на поверхности детали условно наносится ортогональная координатная сетка;
- на пересечении линий координатной сетки выделяются узлы (если на поверхность детали осуществляется подвод или съем теплоты, то узлы обязательно должны находиться в этих точках);

• между узлами в вертикальном и горизонтальном направлениях определяются тепловые сопротивления фрагментов детали по выражению (4.6);

• составляются уравнения теплового баланса;

• для каждого узла детали определяется температура перегрева.

Таблица 4.7. **Коэффициенты теплопроводности материалов**

Неметаллы	α_m, кал/с·см·°С	Металлы	α_m, кал/с·см·°С
Воздух	0,000063	Титан	0,037
Гетинакс	0,00045	Сталь	0,10...0,14
Резина	0,0003...0,0006	Цинк	0,24
Слюда	0,0017	Алюминий и его сплавы	0,29...0,37
Стекло	0,0021	Магний и его сплавы	0,17...0,38
Стеклотекстолит фольгированный	0,043	Бронза	0,54
		Медь	0,54

Пример. На пластину установлены тепловыделяющие элементы $Q1...Q4$ (рис. 4.17). Отвод теплоты осуществляется внизу в месте закрепления пластины. Коэффициент теплопроводнсти пластины во всех направлениях одинаков. Расстояния между тепловыделяющими элементами, элементами и краями пластины одинаковы (в этом случае тепловые сопротивления между элементами и краями пластины будут одинаковы). Для перехода к тепловой модели условно наложим на пластину сетку так, чтобы все тепловыделяющие элементы оказались в узлах этой сетки.

От тепловой модели перейдем к электрической (рис. 4.18), заменив показатели температуры в узлах сетки электрическими потенциалами, тепловые сопротивления — омическими сопротивлениями, а тепловые потоки — токами. При этом

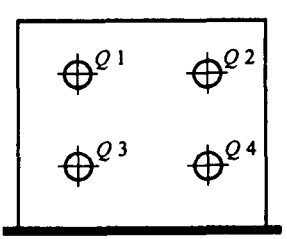


Рис. 4.17. Пластина с тепловыделяющими элементами

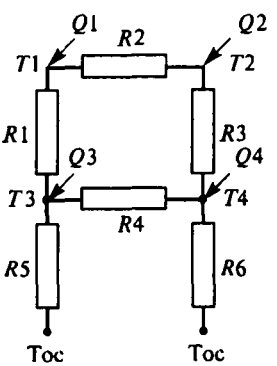


Рис. 4.18. Тепловая (электрическая) модель

$T1 \ldots T4$ — температура в соответствующих узлах сетки; T_{oc} — температура окружающей среды; $R1 \ldots R6$ — тепловые сопротивления (по условиям они равны); $Q1 \ldots Q4$ — тепловые потоки.

Произвольно зададимся направлениями тепловых потоков в сопротивлениях и запишем систему уравнений теплового баланса для узлов $T1 \ldots T4$:

$$\begin{cases} Q1 = (T1 - T3)/R + (T1 - T2)/R; \\ Q2 = (T2 - T1)/R + (T2 - T4)/R; \\ Q3 = (T3 - T1)/R + (T3 - T4)/R + (T3 - T_{oc})/\mathrm{R}; \\ Q4 = (T4 - T2)/R + (T4 - T3)/R + (T4 - T_{oc})/R; \end{cases}$$

$$\begin{cases} R \cdot Q1 = (T1 - T3) + (T1 - T2); \\ R \cdot Q2 = (T2 - T1) + (T2 - T4); \\ R \cdot Q3 = (T3 - T1) + (T3 - T4) + (T3 - T_{oc}); \\ R \cdot Q4 = (T4 - T2) + (T4 - T3) + (T4 - T_{oc}); \end{cases}$$

$$\begin{cases} R \cdot Q1 = 2T1 - T3 - T2; \\ R \cdot Q2 = 2T2 - T1 - T4; \\ R \cdot Q3 = 3T3 - T1 - T4 - T_{oc}; \\ R \cdot Q4 = 3T4 - T2 - T3 - \mathrm{T}_{oc}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} R \cdot Q1 = 2T1 - T3 - T2; \\ R \cdot Q2 = 2T2 - T1 - T4; \\ R \cdot Q3 + T_{oc} = 3T3 - T1 - T4; \\ R \cdot Q4 + T_{oc} = 3T4 - T2 - T3. \end{cases}$$

После преобразований получим систему уравнений, где слева находятся известные переменные, а справа — определяемые величины:

$$\begin{cases} R \cdot Q1 = +2T1 - 1T2 - 1T3 + 0T4; \\ R \cdot Q2 = -1T1 + 2T2 + 0T3 - 1T4; \\ R \cdot Q3 + T_{oc} = -1T1 + 0T2 + 3T3 - 1T4; \\ R \cdot Q4 + T_{oc} = +0T1 - 1T2 - 1T3 + 3T4. \end{cases}$$

Матричная запись данной системы имеет вид:

$$\begin{pmatrix} R \cdot Q1 \\ R \cdot Q2 \\ R \cdot Q3 + T_{oc} \\ R \cdot Q4 + T_{oc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +2 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & +2 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & +3 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & +3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \\ T4 \end{pmatrix},$$

т. е. $B = A \cdot X$. Отсюда $X = A^{-1} \cdot B$ и, следовательно, можно найти решение системы уравнений.

Теплоотвод конвекцией

При конвективном отводе теплоты используют воздушное *естественное*, *принудительное* и *водо-воздушное охлаждение*. При высоких требованиях к стабильности параметров схем применяют *термостатирование* узлов и блоков.

Естественное охлаждение используется в бытовой аппаратуре с плотностью тепловых потоков от охлаждаемых поверхностей не более 0,05 Вт/см^2. Метод охлаждения естественной конвекцией, являясь самым простым, требует повышенного внимания конструктора к вопросам рациональной компоновки по критерию обеспечения нормального теплового режима. При компоновке необходимо стремиться к равномерному распределению выделяемой мощности по всему объему изделия. Компоненты и узлы с большими тепловыделениями необходимо располагать в верхней части корпуса или вблизи стенок, критичные к перегреву компоненты — в нижней части, защищать тепловыми экранами.

Блестящий экран, разделяющий теплонагруженные и чувствительные к перегреву модули, снижает лучистый тепловой поток приблизительно вдвое. В целях выравнивания температуры поверхности внутри аппаратуры теплонагруженные модули должны иметь высокую степень черноты. Для этого внутренние поверхности кожухов и каркасов окрашиваются масляными черными красками или лаками.

Необходимо защищать аппаратуру от прямого попадания солнечных лучей. Перегрев аппаратуры с темной окраской кожуха, освещаемой солнцем при незначительной циркуляции воздуха, может достигать 25...30 °С. Например, имеет место превышение температуры металлических поверхностей (в градусах Цельсия) в умеренном климате при отвесном падении солнечных лучей: без покрытия — 24; окрашенных в белый цвет — 13; серый — 21; черный — 27.

При компоновке аппаратуры необходимо избегать образования «ловушек тепла», в которых отсутствуют конвективные потоки воздуха. Для выравнивания температуры в каналах, образуемых установленными рядами модулей, должны быть зазоры не менее 30 мм.

Различают конструкции с перфорированным и герметичным кожухом. В перфорированном кожухе предусматриваются вентиляционные отверстия круглой, квадратной, прямоугольной формы, жалюзи (рис. 4.19). Например, круглые отверстия имеют диаметр 4, 6, 8 или 10 мм, квадратные могут иметь размеры 4 × 4 мм, прямоугольные 3 × 25, 4 × 50 мм.

Суммарная площадь вентиляционных отверстий в дне (крышке) прибора должна составлять 20...30 % от *живого* сечения, под которым подразумевается свободная для прохода конвективных потоков воздуха площадь сечения прибора. Входные вентиляционные отверстия должны располагать-

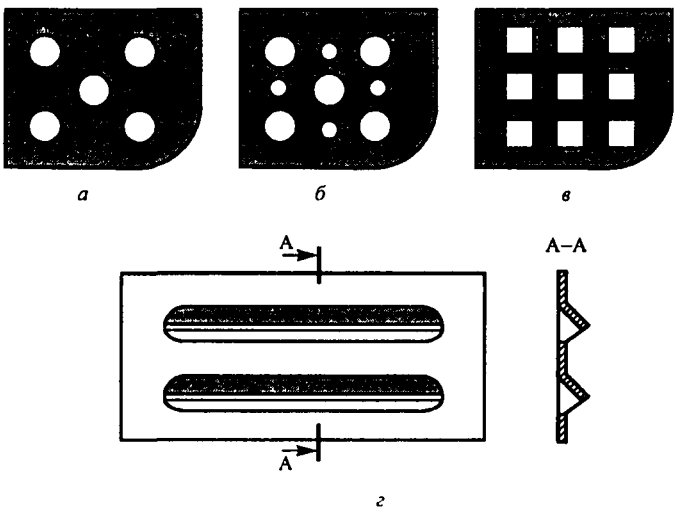


Рис. 4.19. Вентиляционные отверстия (*а*, *б*, *в*) и жалюзи (*г*) кожухов

ся как можно ниже и лучше, если они будут в дне, выходные отверстия предпочтительнее выполнять в крышке прибора.

Чтобы не препятствовать поступлению свободных конвективных потоков воздуха внутрь прибора, между установочной поверхностью и дном должен быть зазор не менее 30 мм, получить который можно установкой прибора на амортизаторы опорные типа АО. С внутренней стороны кожуха вентиляционные отверстия часто закрывают защитными металлическими сетками. Вместо сеток в дне стоек устанавливают пылезащитные фильтры. Зазоры по горизонтали между модулями при естественном воздушном охлаждении должны быть не менее 10 мм.

Циркуляция воздуха в приборах и стойках с герметичным кожухом является следствием разности плотностей воздуха, нагретого внутри ЭА, и более холодного воздуха у стенок кожуха. Перегрев будет уменьшаться с увеличением зазора между модулями. У дна прибора с герметичным кожухом движение воздуха практически отсутствует.

При расчете теплового режима аппаратуры с естественным воздушным охлаждением важно оценить количество теплоты, удаляемой от всех нагреваемых поверхностей изделия.

Количество теплоты, удаляемой от поверхности S естественной конвекцией, Вт,

$$Q = 4{,}187 \cdot 10^{-4} h_c S \Delta t,$$

где S — площадь поверхности, см^2; Δt — перегрев, °С; h_c — коэффициент конвективной теплопередачи, определяемый из $h_c = 0{,}52C(55\Delta t/l)^{0{,}25}$, где

C — постоянная, зависящая от ориентации поверхности (для вертикальной плоскости C = 0,56; для верхней горизонтальной плоскости C = 0,52; для нижней горизонтальной плоскости C = 0,26); l — длина пути теплового потока (табл. 4.8).

Таблица 4.8. **Длина пути теплового потока *l***

Ориентация поверхности	Длина l
Вертикальная плоская	Наибольший размер по вертикали, но не более 50 см
Вертикальная плоская непрямоугольная	Отношение площади к наибольшему горизонтальному размеру
Горизонтальная плоская	Отношение удвоенного произведения длины на ширину к сумме длины и ширины

Пример. Вычислить теплосъем естественной конвекцией с плоской прямоугольной пластины размерами 10×20 см, имеющей перегрев в 20 °С относительно температуры окружающей среды. Теплосъем осуществляется с двух поверхностей пластины. Теплосъемом с торцевых поверхностей пластины пренебрегаем.

Рассмотрим три варианта размещения пластины в пространстве, когда она ориентирована:

А — вертикально короткой стороной вдоль свободных конвективных потоков воздуха;

Б — вертикально длинной стороной вдоль свободных конвективных потоков воздуха;

В — горизонтально поперек свободных конвективных потоков воздуха.

С вертикально ориентированной пластины соответственно снимаются тепловые потоки

$$Q_А = 4{,}187\cdot10^{-4}\cdot0{,}52\cdot0{,}56\cdot\sqrt[4]{55}\cdot(20/10)^{0{,}25}\cdot(2\cdot10\cdot20)\cdot20 = 3{,}16 \text{ Вт};$$

$$Q_Б = 4{,}187\cdot10^{-4}\cdot0{,}52\cdot0{,}56\cdot\sqrt[4]{55}\cdot(2\cdot10\cdot20)\cdot20 = 2{,}65 \text{ Вт}.$$

С верхней горизонтально ориентированной поверхности снимается

$$Q_{Вв} = 4{,}187\cdot10^{-4}\cdot0{,}52\cdot0{,}52\cdot\sqrt[4]{55}\cdot\sqrt[4]{\frac{20(10+20)}{2(10+20)}}\cdot(10\cdot20\cdot20) = 1{,}36 \text{ Вт},$$

с нижней поверхности

$$Q_{Вн} = 4{,}187\cdot10^{-4}\cdot0{,}52\cdot0{,}26\cdot\sqrt[4]{55}\cdot\sqrt[4]{\frac{20(10+20)}{2(10+20)}}\cdot(10\cdot20\cdot20) = 0{,}68 \text{ Вт},$$

что в сумме дает

$$Q_В = 1{,}36 + 0{,}68 = 2{,}04 \text{ Вт}.$$

Таким образом, наилучшая ориентация пластины — вертикальная с направлением потоков воздуха вдоль ее короткой стороны.

Принудительное воздушное охлаждение автономными вентиляторами широко используется в аппаратуре с тепловыделением не более 0,5 Вт/см^2 и выполняется по схемам подачи охлажденного воздуха снизу вверх и сверху вниз. По первой схеме воздух забирается у пола, по второй — у потолка. Забор воздуха у пола, где имеет место наибольшее количество пыли, приводит к повышенной запыленности аппаратуры, охлаждение по схеме сверху вниз — к меньшей запыленности, но требует бóльшего расхода воздуха, поскольку его температура с увеличением высоты забора растет.

Применяются *приточная*, *вытяжная* и *приточно-вытяжная* схемы вентиляции. В приточной схеме вентилятор засасывает охлаждающий воздух внутрь изделия. В вытяжной нагретый воздух выталкивается из изделия. В приточно-вытяжной используются два вентилятора на входе и выходе воздуха из изделия. Работа вентилятора по приточной схеме вентиляции происходит в благоприятных условиях при пониженной температуре в более плотной окружающей среде, что обеспечивает по сравнению с вытяжной вентиляцией бóльшую производительность. Однако в приточной схеме нагнетаемый воздух может частично уходить через неплотности в корпусе и охлаждение аппаратуры может оказаться недостаточным. Вытяжную схему вентиляции, свободную от указанного недостатка, можно рекомендовать к использованию в аппаратуре с большими аэродинамическими сопротивлениями. Приточно-вытяжная схема позволяет увеличить напор охлаждающего воздуха.

Конструктивно автономный осевой вентилятор представляет электродвигатель с крыльчаткой. Вентиляторы устанавливаются либо непосредственно в прибор, либо в специальные блоки, снабжаемые элементами коммутации и фиксации на корпусе блока или каркасе стойки. В блоках размещаются один или несколько вентиляторов, противопыльный фильтр, элементы сигнализации неисправного состояния, аварийного отключения. В зависимости от тепловой нагрузки аппаратуры в блок устанавливается разное число вентиляторов. Незанятые установочные места закрываются заглушками.

Удаляемый из аппаратуры теплый воздух поступает в помещение, из которого выбрасывается в атмосферу либо поступает на рециркуляцию в общую систему кондиционирования. Повышенная запыленность аппаратуры, появление вибраций в результате работы вентиляторов, неравномерность распределения охлаждающего воздуха являются недостатками рассмотренного способа охлаждения. Однако охлаждение автономными вентиляторами реализуется конструктивно просто и обеспечивает высокую гибкость при перепланировке технических средств.

Количество теплоты Q ккал, получаемое воздухом массой m при увеличении его температуры на величину Δt, будет

$$Q = cm\Delta t,$$

где c — удельная теплоемкость воздуха, равная 0,24 ккал/(кг · °С).

Расход воздуха для охлаждения, м^3/час,

$$V_р = 860kP/c\rho\Delta t,$$

где k — коэффициент (обычно 1,25), учитывающий утечку охлаждающего воздуха через неплотности в конструкции; P — потребляемая мощность, кВт; ρ — плотность воздуха (при 0 °С и нормальном атмосферном давлении ρ = = 1,293 кг/м^3).

Мощность, рассеиваемая в ЭА в виде теплоты, принимается равной потребляемой аппаратурой электрической мощности. При полном переходе электрической энергии в тепловую справедливо соотношение 1 кВт/ч = 860 ккал.

Напор и производительность вентилятора определяются точкой пересечения его характеристики с характеристикой аэродинамического сопротивления охлаждаемой аппаратуры (рис. 4.20).

Для выбора вентилятора необходимо знать его характеристики и аэродинамическое сопротивление охлаждаемой аппаратуры. Вентилятор должен обеспечивать производительность $V_в$, равную или с учетом возможной утечки охлаждающего воздуха несколько большую расчетной величины расхода воздуха $V_р$. Если выбранный вентилятор не обеспечивает необходимый расход $V_{в1}$ и его производительность оказывается меньше расчетного значения $V_р$, требуемого для охлаждения ЭА, то она может перегреться и выйти из строя. На рис. 4.20 требуемую величину расхода воздуха $V_р$ на охлаждение аппаратуры с некоторым запасом обеспечивает вентилятор *2* ($V_{в2} > V_р$). Установка более мощного и, следовательно, более громоздкого и тяжелого вентилятора часто не рациональна. Если требуемые параметры не обеспечиваются ни одним из имеющихся в наличии вентиляторов, то возможна установка на совместную работу нескольких. Для повышения производительности вентиляторы устанавливают параллельно, а для увеличения напора — последовательно.

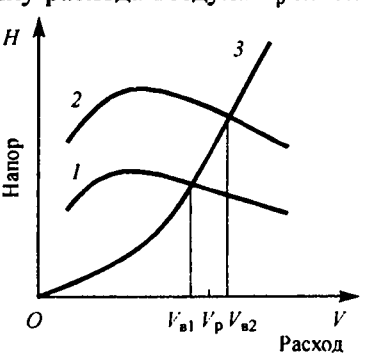


Рис. 4.20. Выбор вентилятора:
1, 2 — характеристики вентиляторов;
3 — аэродинамическая характеристика охлаждаемой аппаратуры

При выборе вентилятора необходимо стремиться, чтобы напор и производитель-

ность в рабочей точке соответствовали максимальному КПД. Иначе может наблюдаться неупорядоченное движение воздуха, когда нагретые потоки воздуха могут наблюдаться в холодной зоне и наоборот, а также вместо прямолинейного движения воздушных потоков — завихрения и циркуляции.

Во избежание попадания в ЭА пыли охлаждающий воздух фильтруют. Материалом фильтров является резиновая крошка, минеральная вата, стекловолокно, фильтровальная ткань или картон. К фильтрам должен обеспечиваться легкий доступ для периодической их замены или чистки.

Для больших ЭВМ со значительными тепловыделениями можно рекомендовать подачу охлаждающего воздуха от центрального кондиционера по системе воздуховодов, размещаемых в подпольном пространстве машинного зала, в стойки. Поскольку охлаждающий воздух подается непосредственно в стойки, то его можно охладить несколько ниже воздуха, подаваемого в машинный зал для охлаждения аппаратуры встроенными автономными вентиляторами и создания комфортных условий обслуживающему персоналу. Это приведет к меньшему расходу переохлажденного воздуха, уменьшению запыленности аппаратуры. Регулировкой расхода воздуха и его параметров можно добиться быстрого ввода ЭВМ в нормальный тепловой режим. Недостатками подобного подхода являются необходимость в разработке системы кондиционирования и воздуховодов, значительные сложности при перепланировке технических средств при установке нового оборудования.

Водо-воздушную систему охлаждения можно рекомендовать для изделий с высокими плотностями компоновки элементов. Отвод теплоты от блоков *2* (рис. 4.21) осуществляется поступающим в стойку от центрального кондиционера или автономных вентиляторов воздухом и жидким хладагентом, протекающим по трубкам к охладителям *1*. Охладитель может быть выполнен в виде системы горизонтально ориентированных параллельно проходящих трубок, расположенных под каждым блоком, но можно совместить охладитель и направляющие ТЭЗ блоков в единой конструкции, что позволит получить два пути передачи теплоты: ТЭЗ — воздух — жидкость и ТЭЗ — охладитель — жидкость. По второму пути теплота от ТЭЗ к охладителю передается кондукцией. Эту систему охлаждения можно применять в герметизируемых стойках. Для эффективного перемешивания воздуха и быстрой передачи теплоты охлаждающей жидкости в стойку вводится вентилятор.

Проточная система охлаждения (см. рис. 4.21, *а*) конструктивно проста, но требует большого расхода жидкого хладагента. Введение в систему теплообменника *3* (рис. 4.21, *б*), в котором происходит охлаждение жидкости, позволяет получить замкнутую систему охлаждения и снизить расход хладагента. В зависимости от особенностей объекта эксплуатации используются теплообменники типа жидкость — воздух и жидкость — жидкость.

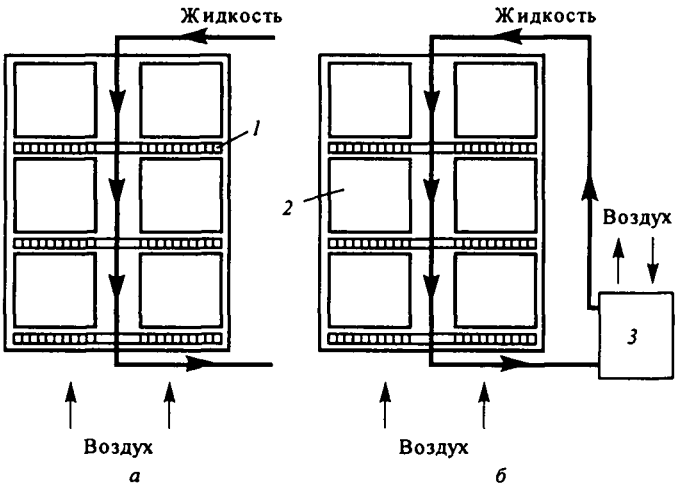


Рис. 4.21. Проточная (а) и одноконтурная замкнутая (б) водо-воздушные системы охлаждения:

1 — охладитель; *2* — охлаждаемый блок; *3* — теплообменник

Теплообменники *жидкость — жидкость* применяются на объектах, позволяющих расходовать на охлаждение аппаратуры большое количество жидкости приемлемой температуры. Изменяя расход жидкости через теплообменник, можно регулировать температуру воздуха в аппаратуре.

Теплоотвод лучеиспусканием

Для расчета мощности, отдаваемой лучеиспусканием $P_л$, от нагретой поверхности S_i с температурой T_i на поверхность с температурой T_j или в окружающую среду, воспользуемся выражениями

$$P_л = \alpha_л S_i (T_i - T_j),$$

$$\alpha_л = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \varepsilon \varphi_{ij} \frac{(T_i + 273)^4 - (T_j + 273)^4}{T_i - T_j},$$

где $\alpha_л$ — коэффициент теплообмена лучеиспусканием, Вт/(м^2 · к); ε — приведенная степень черноты (табл. 4.9); φ_{ij} — коэффициент, показывающий, какая часть энергии тела *i* попадает на тело *j*.

Пример. Вычислить теплосъем лучеиспусканием с покрытой лаком плоской прямоугольной пластины размерами 10х20 см, имеющей перегрев в 20 °С относительно температуры окружающей среды в 20 °С. Теплосъем осуществляется с двух

Таблица 4.9. **Степень черноты материалов**

Материал	Степень черноты
Сталь	0,8
Никель	0,4
Алюминий	0,3
Дюралюминий	0,37
Титан	0,63
Краски эмалевые, лаки	0,92
Краски матовые	0,92
Краска алюминиевая	0,28
Краска бронзовая	0,51

поверхностей пластины. Теплосъемом с торцевых поверхностей пластины пренебречь. Приведенная степень черноты пластины $\varepsilon = 0{,}92$, $\varphi_{ij} = 1{,}0$.

Решение. Съем теплоты осуществляется с двух поверхностей пластины общей площадью $2\times0{,}1\times0{,}2$ м^2

$$\alpha_л = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 0{,}92 \cdot 1{,}0 \frac{(313)^4 - (293)^4}{20} = 5{,}8 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$P_л = 5{,}8 \cdot 2 \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}2 \cdot 20 = 4{,}64 \text{ Вт}.$$

Таким образом, удаление теплоты лучеиспусканием сравнимо с теплотой, удаляемой естественной конвекцией. Однако при высокой плотности компоновки аппаратуры, размещаемой внутри приборных корпусов, эффект удаления теплоты лучеиспусканием будет отсутствовать, так как модули будут нагревать друг друга. Подобные расчеты имеет смысл выполнять для внешних поверхностей приборных корпусов и элементов.

Выбор способа охлаждения

При выборе способа охлаждения ЭА учитываются ее режим работы, конструктивное исполнение, величина рассеиваемой мощности, объект установки, окружающая среда.

Режим работы аппаратуры бывает длительным, кратковременным, кратковременно-повторным и характеризуется длительностями включенного и выключенного состояний. Длительный режим свойственен стационарной аппаратуре, которая находится во включенном состоянии в продолжении многих часов, кратковременный — бортовой, время работы которой мало и исчисляется несколькими минутами или часами. С большой вероятностью можно утверждать, что при проектировании сложной аппаратуры с длительным временем включенного состояния возникнет необходимость в

разработке принудительной системы охлаждения (СО). Для аппаратуры разового использования с кратковременным режимом работы возможно обойтись без принудительной СО. Решение о разработке СО для аппаратуры кратковременно-повторного режима работы принимается лишь после анализа длительностей включенного-выключенного состояний и характера ее перегрева и охлаждения.

Переносная ЭА в силу малых рассеиваемых мощностей принудительной СО не снабжается. В сложной аппаратуре необходимо использовать принудительную воздушную или водо-воздушную СО. Водо-воздушной СО снабжаются, например, ЭВМ в герметичном исполнении.

Тепловой анализ ЭА позволяет получить предварительные данные о разрабатываемой СО. Для этого по каждому модулю первого уровня составляется перечень тепловыделяющих компонентов, устанавливаются рассеиваемые мощности и максимально допустимые температуры. На основе этих данных выделяются критичные к перегреву компоненты, а также компоненты, устанавливаемые на теплоотводы. Далее рассчитываются удельные поверхностные или/и объемные тепловые потоки модулей высших уровней. Для этого нужно вычислить мощности, рассеиваемые в модулях компонентами, внешнюю поверхность или объем модулей. По значениям плотности теплового потока q_s и q_v в первом приближении выбирают систему охлаждения (табл. 4.10) по допустимому перегреву в 40 °С.

Таблица 4.10. **Плотность тепловых потоков аппаратуры**

Способ охлаждения	Негерметичная q_s, Вт/см^2, не более	Герметичная q_v, Вт/см^3, не более
Естественная конвекция	0,05	0,02
Принудительная конвекция	0,50	0,45
Водо-воздушный	0,65	0,60

Затем для всех модулей, начиная с модулей первого уровней, составляется перечень компонентов или модулей низших уровней, осуществляется размещение их по критерию минимального перегрева, по уравнению теплового баланса определяется расход хладагента. Если в качестве хладагента предполагается использовать воздух, то необходимо установить его количество, максимально возможную температуру на входе СО, проверить запыленность и наличие в нем агрессивных примесей. Присутствие пыли в воздухе требует установки противопылевых фильтров. Наличие в воздухе агрессивных газов, например сернистого ангидрида, вызывающего интенсивную коррозию металлических конструкций, потребует применения специальных фильтров.

Воздух на входе СО может оказаться теплым, для его охлаждения до необходимой температуры в СО предусматривается кондиционер. При отсутствии на объекте эксплуатации воздуха в необходимом количестве или с необходимыми параметрами можно использовать жидкий хладагент (воду, топливо) по схеме водо-воздушного охлаждения. Температура жидкого хладагента может быть понижена теплообменниками.

Отсутствие на объекте достаточного количества воздуха или жидкости заставляет конструктора предусмотреть отвод теплоты на холодные массивные элементы несущих конструкций кондукцией. Если на объекте не окажется источников электропитания с требуемыми напряжениями и мощностями, возникает необходимость во введении в конструкцию источников питания СО, что несомненно ухудшит основные конструктивные параметры охлаждаемой ЭА.

4.6. Защита конструкции от воздействия помех

Помеха — непредусмотренный при проектировании ЭА сигнал, способный вызвать нежелательное воздействие, выраженное в виде нарушения функционирования, искажения передаваемой или хранимой информации и т. п. Помехами могут быть напряжения, токи, электрические заряды, напряженность поля и др. Источники помех весьма многообразны по физической природе и подразделяются на внутренние и внешние.

Внутренние помехи возникают внутри работающей аппаратуры. Источниками электрических помех являются блоки питания, цепи распределения электроэнергии, термопары, потенциалы, возникающие при трении. Источниками магнитных помех являются трансформаторы и дроссели. При наличии пульсаций выходного напряжения вторичных источников электропитания цепи распределения электроэнергии, тактирующие и синхронизирующие цепи следует рассматривать как источники электромагнитных помех. Значительные помехи создают электромагниты, электрические двигатели, реле и электромеханические исполнительные механизмы устройств ввода и вывода информации ЭА. Внутренними помехами являются помехи от рассогласования волновых сопротивлений линий связи с входными и выходными сопротивлениями модулей, которые эти линии соединяют, а также помехи, возникающие по *земле*.

Под *внешними помехами* понимаются помехи сети электропитания, сварочных аппаратов, щеточных двигателей, передающей радиоэлектронной аппаратурой и пр., а также помехи, вызванные разрядами статического электричества, атмосферными и космическими явлениями, ядерными взрывами.

Действие на аппаратуру внешних помех по физической природе аналогично действию внутренних помех.

Приемниками помех являются высокочувствительные усилители, линии связи, магнитные элементы, характеристики которых изменяются под действием полей рассеивания источников помех. Помехи проникают в аппаратуру непосредственно по проводам или проводникам (гальваническая помеха), через электрическое (емкостная помеха), магнитное (индуктивная помеха) или электромагнитное поле. Многочисленные проводники, входящие в состав любой аппаратуры, можно рассматривать как приемопередающие антенные устройства, принимающие или излучающие электромагнитные поля.

Гальваническая связь возникает в результате протекания токов и падения напряжений на электрических соединениях конструкций. На рис. 4.22 приведена схема, состоящая из M_n модулей с общим питающим напряжением и общим нулевым потенциалом (землей).

Допустим, что из n модулей схемы функционирует последний модуль M_n, а остальные находятся в режиме ожидания. При протекании тока к модулю M_n на шинах питания и земле будет иметь место падение напряжений

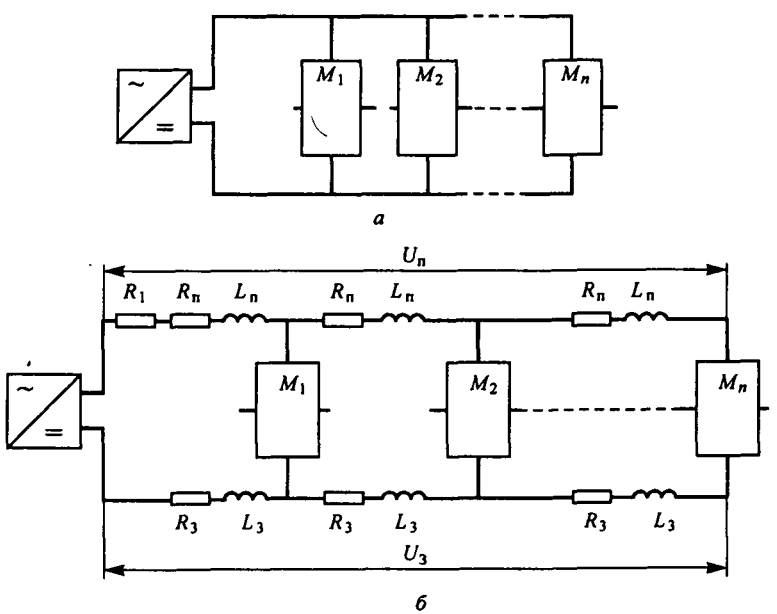


Рис. 4.22. Принципиальная (*а*) и расчетная (*б*) схемы подвода питания и земли:

R_1 — выходное сопротивление вторичного источника питания; $R_п$, $R_з$ — активное сопротивление участка шины питания и земли; $L_п$, $L_з$ — индуктивность участка шины питания и земли

$U_п$ и $U_з$ (гальваническая помеха), которые могут сказаться на работоспособности модулей M_1 ... M_{n-1}. При функционировании одновременно нескольких модулей схемы гальваническая помеха значительно возрастает.Поэтому проводники, объединяющие модули в единую систему, должны быть по возможности короткими, а их поперечные сечения возможно бóльшими, что приводит к уменьшению активного сопротивления и индуктивности проводов.

Радикальным способом устранения гальванической помехи является устранение цепей, по которым проходят совместные токи питания и земли как чувствительных к помехам схем, так и сравнительно не чувствительных мощных схем. Таким образом, по проводам, связывающим модули в систему, передаются как полезные сигналы, так и сигналы помехи. Эффективным схемным средством селективного ослабления помехи при отсутствии ослабления и искажения сигнала является использование *помехоподавляющих фильтров*.

Фильтры характеризуются *частотой среза* $f_{ср}$ и *коэффициентом фильтрации* $K_ф$, равным отношению сигнала на входе и выходе фильтра. В табл. 4.11 приведены электрические схемы и характеристики фильтров. Зная спектр частот полезного сигнала и помехи, задаваясь ослаблением помехи до приемлемых значений (в идеальном случае до нуля), по характеристикам выбирают схему фильтра или составляют многозвенный, состоящий из нескольких фильтров.

Сетевые фильтры — полосопропускающие фильтры, передающие на выход только частоту сетевого напряжения и в то же время не допускающие передачи помех по проводам в сеть от источника электропитания. В схеме сетевого фильтра, приведенной на рис. 4.23, конденсатор *C*1 ослабляет противофазные, а конденсаторы *C*2, *C*3 и трансформатор *TV* — синфазные помехи (симметрирующий трансформатор *TV* с одинаковым направлением намоток имеет высокое сопротивление синфазным помехам и низкое противофазным). Сопротивление *TV* переменному току частоты сети фактически равно активному сопротивлению его обмоток. Для защиты аппаратуры от перенапряжений первичной сети в схему сетевого фильтра вводят газоразрядники, варисторы, стабилитроны, предохранители (*FU*).

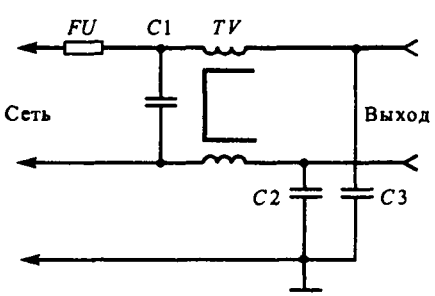
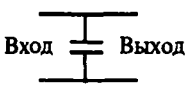
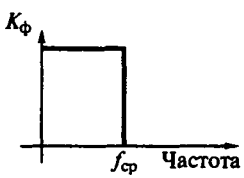
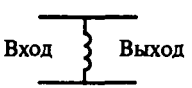
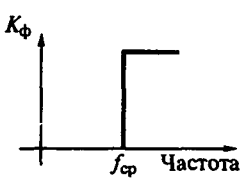
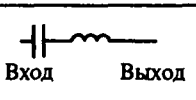
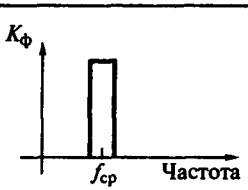
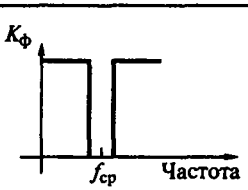


Рис. 4.23. Сетевой фильтр

Экраны включаются в конструкцию для ослабления нежелательного возмущающего поля в некотором ограниченном объеме до приемлемого уровня. Возможны два варианта защиты. В первом случае экранируемая аппаратура размещается внутри экрана, а источник помех — вне его, во втором —

экранируется источник помех, а защищаемая от помех аппаратура располагается вне экрана. Первый вариант используют при защите от внешних помех, второй — внутренних. В обоих вариантах в качестве экранов используются металлические оболочки.

Таблица 4.11. **Избирательные однозвенные электрические фильтры**

Наименование фильтра	Схема	Характеристика
Низкочастотный		
Высокочастотный		
Полосопропускающий		
Полосоограничивающий		

В ЭА функции экранов чаще всего выполняют кожухи, панели и крышки приборов блоков и стоек, при выборе материалов и расчете толщины которых кроме соображений эффективности экранирования необходимо учитывать требования обеспечения механической прочности, жесткости, надежности соединения отдельных элементов, минимума массы.

Отверстия и щели в экранах уменьшают эффективность экранирования, поэтому, конструируя экран, их необходимо исключать или свести к минимуму. Однако полностью от них избавиться невозможно. Щели возни-

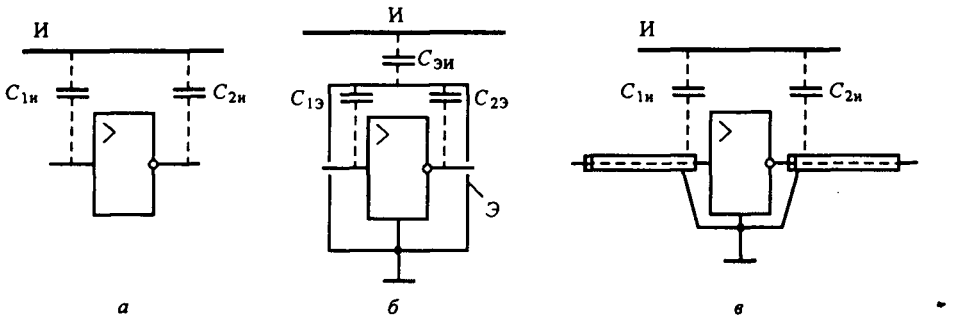


Рис. 4.24. Модуль под воздействием электрического поля (*а*), защищенный экраном (*б*), экранированным проводом (*в*)

кают, если аппаратура защищается крышками и панелями (лицевыми, монтажными и др.), устанавливаемыми и закрепляемыми на каркасе. Отверстия вводятся в кожух для установки соединителей, элементов управления, индикации, обеспечения нормального теплового режима. Эффективность экрана не ухудшится, если в его конструкции выполнены отверстия, максимальные размеры которых не превышают 1/2 минимальной длины волны экранируемого сигнала. Чтобы помеха не проникала через вентиляционные отверстия, на внутренних поверхностях кожухов с отверстиями закрепляется металлическая сетка с размером шага не более 1/2 минимальной длины волны помехи.

Принцип действия *электрического экрана* рассмотрим на конкретном примере (рис. 4.24), когда между источником помехи И электрического поля (провод, по которому протекает ток) и входной-выходной линиями модуля имеет место емкостная связь на входную $C_{1и}$ и выходную $C_{2и}$ линии усилителя (см. рис. 4.24, *а*), приводящая к искажению как входного, так и выходного сигнала. Результатом введения в конструкцию заземленного экрана Э высокой проводимости (см. рис. 4.24, *б*) будет появление паразитных емкостей на экран источника помехи $C_{эи}$, входной $C_{1э}$ и выходной $C_{2э}$ линий. Источник помех окажется подсоединенным на землю через емкость $C_{эи}$, а вход и выход схемы — нагруженными на емкости $C_{1э}$ и $C_{2э}$, что должно учитываться схемотехником при оценке параметров и характеристик схемы.

Тех же результатов для данного примера можно добиться, используя вместо общего экрана экранированные провода для входной и выходной линий (см. рис. 4.24, *в*). Более того, поскольку входной сигнал схемой усилителя увеличивается многократно, то чаще всего оказывается достаточным экранировать только входную цепь. Для устранения гальванической помехи по земле экраны проводов необходимо заземлять в одной точке, как это показано на схеме.

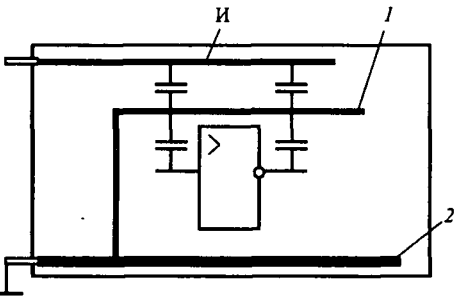


Рис. 4.25. Экранирование печатных проводников платы

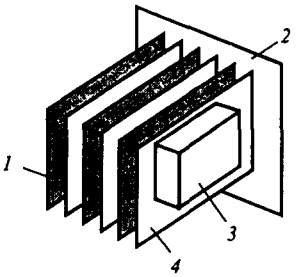


Рис. 4. 26. Экранирование печатных плат в блоке:

1 — проводящая пластина; *2* — монтажная панель; *3* — коробчатый экран; *4* — печатная плата с компонентами

При выполнении линий передачи схемы печатным способом (рис. 4.25) вводятся экранирующие трассы *1*, коммутируемые с шиной нулевого потенциала (землей) *2* и выполняющие функции экранов проводов. Если источник помехи И расположен на соседней плате, то защита схемы экранирующей трассой невозможна.

На рис. 4.26 показан блок из трех плат (незачерненных), установленных в соединители монтажной панели *2*. Левая и центральная платы защищены экранами в виде заземленной проводящей пластины *1*. С правой стороны блока экранирующая пластина отсутствует, а защита чувствительной к помехе области платы с компонентами осуществляется заземляемым и фиксируемым на плате коробчатым экраном *3*.

В многослойных ПП (МПП) функции экрана выполняют сплошные слои фольги с нулевым потенциалом, поэтому в блоке, использующем МПП, необходимость в экранирующих пластинах отпадает.

Таким образом, защита от электрического поля сводится к введению в конструкцию заземленных металлических оболочек, пластин, трасс, сплошных металлических слоев МПП произвольной толщины и высокой электрической проводимости. Заземляться экраны должны массивными короткими проводниками с минимальным индуктивным сопротивлением.

Экранные оболочки весьма разнообразны как по форме, так и по применяемым материалам. При выполнении экрана из отдельных конструктивных элементов необходимо особое внимание уделять электрической связи между элементами и общему заземлению. Чтобы конструктивные элементы кожуха блока (рис. 4.27) выполняли функцию экрана, детали *1*—*3*, *6*, *7* должны электрически объединяться между собой и с несущей конструкцией модуля, в который устанавливается блок. Для этого к элементам кожуха в

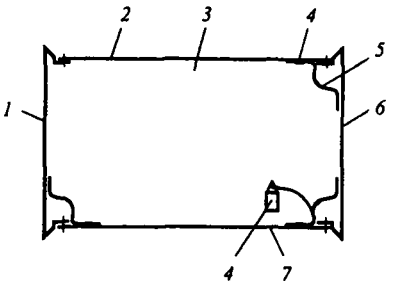


Рис. 4.27. Электрическое объединение деталей кожуха блока:

1 — передняя панель; *2* — крышка; *3* — стенка; *4* — контактный лепесток заземления; *5* — провод; *6* — задняя панель; *7* – дно

легкодоступных местах с предварительным удалением покрытия привариваются земляные лепестки *4*, коммутируемые между собой гибкими многожильными проводами *5* пайкой. Легкосъемность конструкции обеспечивается заземлением *под винт*. Для надежного контакта под головку винта вводится пружинная шайба.

Задача *экранирования магнитного поля* сводится к уменьшению или полному устранению индуктивной связи между источником и приемником помехи. Если магнитный поток пересекает контур, образуемый проводником (проводниками), то в контуре наводится помеха. Значение индуцируемого напряжения, В, помехи вычисляется по формуле

$$U = -SdB / dt,$$

где B — магнитная индукция, Тл; S — площадь контура, м^2.

Для полного устранения или уменьшения напряжения помехи, наводимой в контуре, необходимо:

- поместить контур в экран;
- ориентировать его так, чтобы магнитные силовые линии поля не пересекали контур, а проходили вдоль него;
- уменьшить площадь контура.

Магнитные экраны выполняют как из ферромагнитных, так и немагнитных металлов. Ферромагнитные материалы с большой относительной магнитной проницаемостью μ обладают малым магнитным сопротивлением, в результате чего линии магнитного поля будут шунтированы материалом экрана, и пространство внутри экрана не будет подвергаться воздействию магнитного поля (рис. 4.28). Стрелками на рисунке показано направление воздействия магнитного поля.

Магнитное экранирование тем эффективнее, чем больше магнитная проницаемость экрана и толще экран. Однако, если напряженность магнитного экрана станет равной или превысит коэрцитивную силу материала экрана, то произойдет его намагничивание до насыщения. Когда насыщенный слой достигнет внутренней поверхности стенки экрана, магнитное поле появится внутри экранируемого пространства. При выборе материала экрана необходимо помнить, что магнитная проницаемость с увеличением частоты поля уменьшается и это сказывается на эффективности экранирования.

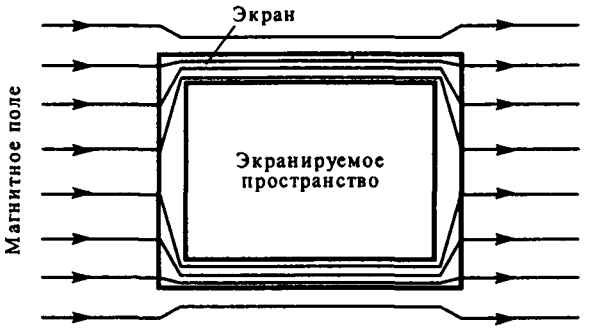


Рис. 4.28. Ферромагнитный экран

Ферромагнитные материалы эффективно защищают аппаратуру в диапазоне частот от 0 до 10 кГц.

Действие экрана из немагнитного металла основано на вытеснении внешнего магнитного поля из внутреннего пространства прибора материалом экрана. Внешнее переменное магнитное поле создает индукционные вихревые токи в экране, а те, в свою очередь, — магнитное поле, направленное навстречу внешнему полю внутри экрана, а за экраном — совместно с направлением внешнего (возбуждающего) поля (рис. 4.29). У экранов из немагнитных металлов эффективность экранирования повышается с увеличением толщины и проводимости материала экрана. Магнитное поле частотой выше 10 МГц достаточно надежно экранируется, если на диэлектрический кожух наносится медное или серебряное покрытие толщиной не более 100 мкм. Толщина немагнитного экрана может в несколько раз превысить толщину ферромагнитного, обеспечивающего на фиксированной частоте одинаковое ослабление. Использование ферромагнитного материала позволяет

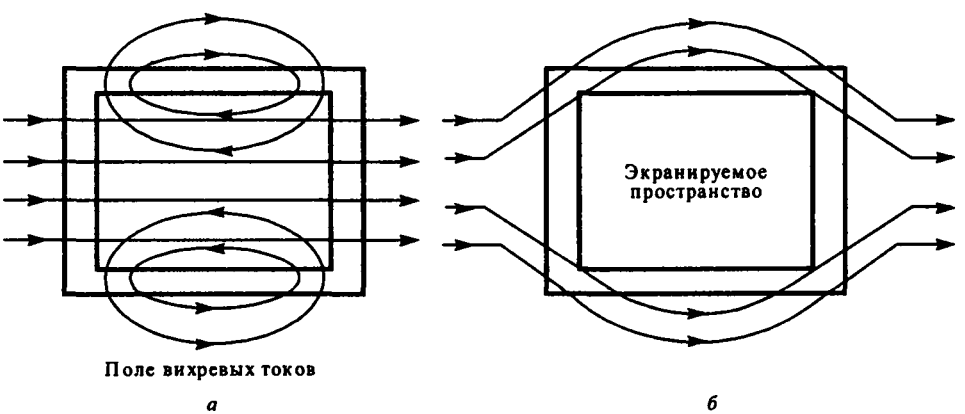


Рис. 4.29. Экранирование магнитного поля немагнитными металлами

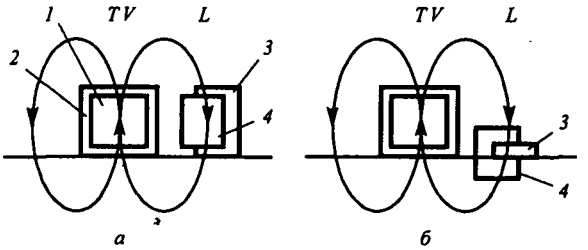


Рис. 4.30. Расположение сетевого трансформатора и дросселя фильтра:
1, 3 — магнитопровод; *2, 4* — обмотка

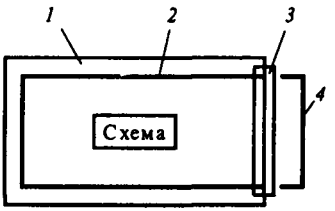


Рис. 4.31. Внешний контур — экран печатной платы:
1 — печатная плата; *2* — печатная трасса контура; *3* — соединитель; *4* — провод контура

значительно снизить массу экрана. При экранировании магнитного поля заземление экрана не обязательно, поскольку оно не влияет на качество экранирования.

Однако перед тем как конструировать экран, необходимо предусмотреть все меры, чтобы избавиться от помехи более простым и дешевым способом. Например, во вторичном источнике питания имеет место сетевой трансформатор *TV* и дроссель фильтра *L* (рис. 4.30), которые обычно располагаются рядом. Поле рассеяния *TV* захватывается магнитопроводом дросселя и в дросселе будет наводиться значительная сетевая помеха (см. рис. 4.30, *а*), поскольку линии поля *TV* направлены ортогонально виткам обмотки *L*. Помеху можно уменьшить, разместив *TV* и *L* как можно дальше друг от друга или целиком устранить, ориентируя дроссель так, чтобы силовые линии поля *TV* проходили вдоль витков обмотки дросселя (см. рис. 4.30, *б*).

Уменьшение площади контура, пересекаемого силовыми линиями магнитного поля, получают укладыванием сигнальных проводников непосредственно по заземленным монтажным панелям модулей.

Защитным контуром ТЭЗ от действия магнитного поля может служить печатная трасса по контуру платы, коммутируемая с крайними выводами соединителя, и провод *4*, подпаянный к соответствующим выводам ответной части *3* соединителя (рис. 4.31). Возникающий в замкнутом контуре индукционный ток имеет такое направление, что создаваемый им магнитный поток стремится компенсировать изменение магнитного потока, которым вызывается данный ток. В результате схема на плате внутри контура не будет подвержена воздействию паразитного магнитного поля.

Электромагнитное экранирование охватывает диапазон частот от 1 кГц до 1 ГГц. Действие электромагнитного экрана основано на отражении электромагнитной энергии и ее затухании в толще экрана. Как видно из рис. 4.32, электромагнитная энергия *W* отражается на границах диэлектрик-экран

$W_{дэ}$ и экран-диэлектрик $W_{эд}$, затухает в толще экрана $W_э$ и частично проникает в экранируемое пространство $W_п$.

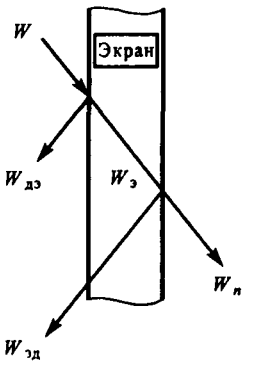


Рис. 4.32. Электромагнитный экран

Экранирование поглощением объясняется тепловыми потерями на вихревые токи в материале экрана, экранирование отражением — несоответствием волновых параметров материала экрана и окружающей среды. Для нижней границы частотного диапазона первостепенное значение приобретает отражение, для верхней границы — поглощение электромагнитной энергии. Электромагнитное экранирование выполняется как немагнитными, так и магнитными металлами. Немагнитные металлы высокой проводимости можно эффективно использовать в низкочастотной части спектра, ферромагнитные материалы высокой магнитной проницаемости и электрической проводимости — во всем частотном диапазоне электромагнитного поля. Толщина экрана должна быть по возможности наибольшей.

Можно дать следующие рекомендации по выбору материалов при электромагнитном экранировании. Для частот менее 1 МГц хорошие результаты дают медные и алюминиевые экраны, а при частотах выше 1 МГц — экраны из стали. Однако наилучшие результаты можно получить при применении многослойных экранов — последовательно чередующихся слоев магнитных и немагнитных металлов. Возможны различные варианты материалов слоев: медь—пермаллой—медь, пермаллой—медь, медь—сталь—медь и др. Введение воздушного промежутка между слоями в 20...40 % суммарной толщины экрана улучшит эффективность экранирования. При защите аппаратуры от внешнего поля материал с низкой магнитной проницаемостью помещают наружу, с высокой — внутрь. Если экран защищает источник электромагнитного поля, то материал с низкой магнитной проницаемостью должен быть внутренним слоем, а с высокой — наружным.

В табл. 4.12 приведены свойства немагнитных, а в табл. 4.13 — магнитных металлов. Из немагнитных материалов с позиций минимальной стоимости и массы наилучшими свойствами обладает магний, но он легко корродирует, а образующийся слой окисла ухудшает контакт экрана с корпусом изделия. Цинк дешевле меди, имеет меньшую плотность, но мягок. Латунь по своим параметрам занимает среднее положение в ряду материалов, но благодаря отличным антикоррозионным свойствам и стабильности сопротивления электрического контакта ее можно рекомендовать для широкого применения в качестве материала экрана.

Таблица 4.12. **Немагнитные материалы экранов**

Материал	Плотность, кг/м^3	Удельное сопротивление, Ом · мм^2/м	Относительная стоимость
Алюминий	2700	0,028	0,29
Латунь	8700	0,06	0,85
Медь	8890	0,0175	0,6
Магний	1740	0,042	0,36
Серебро	10500	0,018	34,0
Цинк	7140	0,059	0,17

Таблица 4.13. **Ферромагнитные материалы экранов**

Материал	Плотность, кг/м^3	Удельное сопротивление, Ом · мм^2/м	Магнитная проницаемость $\mu \cdot 1{,}26 \cdot 10^{-6}$, Гн/м	Индукция, Тл	Напряженность, А/м
Никель	8900	0,1	20000	0,85	30
Железо	7880	0,098	1000	1,70	27
Сталь Э310	7750	0,5	1000	1,75	10
Пермаллой					
45Н	8180	0,55	2000	1,50	20
79НМ	8750	0,50	10000	0,75	5

Железо, если бы не низкая его коррозионная стойкость, является наилучшим материалом для магнитных экранов. В ЭА получили распространение экраны из стали и пермаллоев. Стальные экраны с малой начальной магнитной проницаемостью обеспечивают малое, но постоянное экранирование как на низких, так и на частотах вплоть до десяти килогерц. Экраны из пермаллоев с высокой начальной проницаемостью позволяют получить эффективное экранирование, но в узком диапазоне частот от нуля до нескольких сотен герц. С увеличением частоты возрастают вихревые токи экрана, которые вытесняют магнитное поле из толщи экрана и уменьшают его магнитопроводимость, а это сказывается на эффективности экранирования.

Расчеты экранов сводятся к определению ослабления нежелательного поля внутри экранируемого пространства при выбранном материале и толщины стенки экрана.

4.7. Надежность конструкции ЭА

Надежность — свойство ЭА выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в за-

данных пределах, при соблюдении режимов эксплуатации, правил технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Ресурс — продолжительность работы ЭА до предельного состояния, установленного в нормативно-технической документации.

Случайное событие, приводящее к полной или частичной утрате работоспособности ЭА, называется *отказом*.

Отказы по характеру изменения параметров аппаратуры до момента их возникновения подразделяют на *внезапные (катастрофические)* и *постепенные*. Постепенные отказы характеризуются временным изменением одного или нескольких параметров, внезапные — скачкообразно изменяющимися.

По взаимосвязи между собой различают отказы *независимые*, не связанные с другими отказами, и *зависимые*.

По повторяемости возникновения отказы бывают *одноразовые (сбои)* и *перемежающиеся*. Сбой — однократно возникающий самоустраняющийся отказ, перемежающийся — многократно возникающий сбой одного и того же характера.

По наличию внешних признаков различают отказы *явные*, т. е. имеющие внешние признаки после их появления, и *неявные (скрытые)*, для обнаружения которых требуется провести соответствующие действия.

По причине возникновения отказы подразделяют на *конструкционные, производственные и эксплуатационные*, вызванные нарушением установленных норм и правил при конструировании, производстве и эксплуатации ЭА.

По характеру устранения отказы делятся на *устойчивые* и *самоустраняющиеся*. Устойчивый отказ устраняется заменой отказавшего элемента (модуля), а самоустраняющийся исчезает сам, но может повториться. Самоустраняющийся отказ может проявиться в виде сбоя или в форме *перемежающегося* отказа.

Возникновение отказов происходит как из-за внутренних свойств аппаратуры, так и из-за внешних воздействий и носит случайный характер. Для количественной оценки отказов используют вероятностные методы.

Безотказность — способность ЭА непрерывно сохранять заданные функции в течение установленного в технической документации времени — характеризуется вероятностью безотказной работы $P(t)$, частотой отказов $f(t)$, интенсивностью отказов $\lambda(t)$, средней наработкой на отказ (продолжительность работы изделия до появления отказа) $T_{ср}$. В некоторых случаях надежность ЭА удобно оценивать вероятностью отказа $q(t) = 1 - P(t)$.

Вероятность безотказной работы и частоту отказов можно найти статистически по данным об отказах эксплуатируемых изделий

$$P = (N - n)/N, \quad f = n/(Nt),$$

где N — число изделий в начале испытаний; n — число изделий, отказавших за время испытаний t (при значительном числе изделий вероятность P совпадает с вероятностью $P(t)$, а частота отказов f — с $f(t)$).

Функцию частоты отказов можно записать в виде

$$f(t) = [q(t + \Delta t) - q(t)]/\Delta t.$$

При $\Delta t \to 0$ вероятность отказа $q(t)$ можно определить интегрированием функции частоты отказов

$$q(t) = \int_0^t f(t)dt.$$

За время t вероятность безотказной работы

$$P(t) = 1 - q(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt. \qquad (4.7)$$

Продифференцировав (4.7), получим $dP(t)/dt = -f(t)$ или $f(t) = -dP(t)/dt = -P'(t)$. Таким образом, функция $f(t)$ характеризует скорость снижения надежности во времени.

Критерием, более полно определяющим надежность неремонтируемой ЭА и ее модулей, является *интенсивность отказов* $\lambda(t)$ — число отказов в единицу времени, отнесенное к среднему числу изделий, безотказно функционирующих в указанный промежуток времени. Этот показатель характеризует надежность ЭА в любой момент времени и рассчитывается по формуле

$$\lambda(t) = \Delta n_i/(N_{ср}\Delta t_i),$$

где $\Delta n_i = N_i - N_{i+1}$ — число отказов; $N_{ср} = (N_i + N_{i+1})/2$ — среднее число работоспособных изделий; N_i и N_{i+1} — количество работоспособных изделий в начале и конце промежутка времени Δt_i.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ связана с интенсивностью отказов $\lambda(t)$ зависимостью

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t)dt\right]. \qquad (4.8)$$

Если ЭА содержит N последовательно соединенных однотипных элементов, то

$$\lambda_N(t) = N\lambda(t).$$

Средняя наработка на отказ $T_{ср}$ и вероятность безотказной работы $P(t)$ связаны зависимостью

$$T_{ср} = \int_0^{\infty} P(t)dt. \qquad (4.9)$$

По статистическим данным

$$T_{ср} = \sum_{i=1}^{m} \Delta n_i t_{cpi} / N_i;, \qquad t_{cpi} = (t_i + t_{i+1})/2; \qquad m = t/\Delta t,$$

где Δn_i — количество отказавших изделий за интервал времени $\Delta t_{ср} = t_{i+1} - t_i$; t_i, t_{i+1} — соответственно время в начале и конце интервала испытаний ($t_1 = 0$); t — интервал времени, за который отказали все изделия; m — число временных интервалов испытаний.

Пример. Из 15 неремонтируемых изделий в первый год эксплуатации отказало 10, во второй — 5. Определить вероятность безотказной работы, частоту отказов, интенсивность отказов в первый год эксплуатации, а также среднюю наработку до первого отказа.

Решение:

$$P = \frac{15-10}{15} = 0{,}3; \quad f = \frac{10}{15 \cdot 1} = \frac{2}{3} \text{ г}^{-1};$$

$$\lambda(1) = \frac{15-5}{\frac{15+5}{2} \cdot 1} = \text{ г}^{-1}; \quad T_{ср} = \sum_{1}^{2} \frac{10 \cdot 0{,}5 + 5 \cdot 1{,}5}{15} \approx 0{,}8 \text{ г}.$$

Вероятность безотказной работы ЭА

Возникновение отказов в ЭА носит случайный характер. Следовательно, время безотказной работы есть *случайная величина*, для описания которой используют разные распределения: Вейбулла, экспоненциальный, Релея, Пуассона.

Отказы в ЭА, содержащей большое число однотипных неремонтируемых элементов, достаточно хорошо подчиняются *распределению Вейбулла*, а вероятность безотказной работы $P(t)$, частота отказов $f(t)$, средняя наработка на отказ $T_{ср}$ вычисляются по следующим формулам:

$$P(t) = \exp(-\lambda_0 t^b),\ t \geqslant 0,\ \lambda_0 > 0,\ b > 0; \tag{4.10}$$

$$f(t) = -P'(t) = \lambda_0\ bt^{b-1}\ \exp(-\lambda_0 t^b); \tag{4.11}$$

$$T_{ср} = \int_0^\infty P(t)dt = \int_0^\infty \exp(-\lambda_0 t^b)dt = \lambda_0^{-1/b}\,\Gamma(1+1/b), \tag{4.12}$$

где Γ — гамма-функция; λ_0 и b — параметры распределения.

Из (4.10) и (4.11) получим

$$\lambda(t) = f(t)/P(t) = \lambda_0 bt^{b-1}.$$

Пример. Время безотказной работы системы подчиняется закону Вейбулла с параметрами $b = 1,5$ и $\lambda_0 = 10^{-4}$ ч$^{-1}$. Определить параметры надежности системы за время работы $t = 100$ ч.

Решение:

- $P(100) = \exp(-10^{-4,100^{1,5}}) = \exp(-0,1) = 0,9$;
- $f(100) = 10^{-4} \cdot 1,5 \cdot 100^{0,5} \cdot 0,9 = 1,35 \cdot 10^{-3}$ ч$^{-1}$;
- $\lambda(100) = 1,35 \cdot 10^{-3} / 0,9 = 1,5 \cdot 10^{-3}$ ч$^{-1}$;
- $T_{ср} = (10^{-4})^{1/1,5} \cdot \Gamma(1,67) = 418$ ч.

Экспоненциальное распределение (частный случай распределения Вейбулла при $b = 1$) основано на предположении постоянной во времени интенсивности отказов и успешно может быть использовано при расчетах надежности аппаратуры одноразового применения, содержащей большое число неремонтируемых компонентов.

Характеристики надежности при этом распределении выглядят следующим образом:

$$P(t) = \exp(-\lambda t);$$
$$f(t) = \lambda\ \exp(-\lambda t);$$
$$\lambda(t) = f(t)/P(t) = \lambda = \text{const};$$
$$T_{ср} = \int_0^\infty \exp(-\lambda t) = 1/\lambda,$$

где λ — параметр распределения.

Пример. Время безотказной работы системы подчиняется экспоненциальному закону с параметром $\lambda_0 = 10^{-4}$ ч$^{-1}$. Определить параметры надежности системы за время работы $t = 100$ ч.

Решение:

- $P(100) = \exp(-10^{-4} \cdot 100) = 0{,}99$;
- $f(100) = 10^{-4} \cdot 0{,}99 = 0{,}99 \cdot 10^{-4}$ ч$^{-1}$;
- $T_{ср} = 1/10^{-4} = 10^4$ ч.

При длительной работе ЭА при планировании ее ремонта важно знать не вероятность возникновения отказов, а их число за определенный период эксплуатации. В этом случае применяют *распределение Пуассона*, позволяющее подсчитать вероятность появления любого числа случайных событий за некоторый период времени. При расчетах для распределения Пуассона характерны те же ограничения, что и для экспоненциального. Распределение Пуассона применимо для оценки надежности ремонтируемой ЭА с простейшим потоком отказов.

Вероятность отсутствия отказа за время t составляет $P_0 = \exp(-\lambda t)$, а вероятность появления i отказов за то же время $P_i = \lambda^i t^i \exp(-\lambda t)/i!$, где $i = 0, 1, 2, ..., n$ — число отказов.

Пример. Вероятность безотказной работы ЭВМ с параметром $\lambda = 10^{-3}$ ч$^{-1}$ подчиняется закону Пуассона. Определить вероятность отсутствия отказа и появления двух отказов в продолжении 1000 ч работы ЭВМ.

Решение:

- $P_0 = \exp(-10^{-3} \cdot 1000) = 0{,}36$;
- $P_2 = 10^{-6} \cdot 10^6 \cdot 0{,}36/2 = 0{,}18$.

Распределение Релея описывает поведение ЭА и составляющих ее элементов с явно выраженными признаками их старения и износа. При этом

$$P(t) = \exp(-t^2/2C^2);$$
$$f(t) = t/C^2 \exp(-t^2/2C^2);$$
$$\lambda(t) = t/C^2;$$
$$T_{ср} = C\sqrt{\pi/2},$$

где C — параметр распределения.

Пример. Время безотказной работы ЭА подчиняется распределению Релея с параметром $C = 500$ ч. Определить параметры надежности ЭА за время работы $t = 100$ ч.

Решение:

- $P(100) = \exp(-100^2/2500^2) = 0{,}980$;
- $f(100) = 100/500^2 \cdot \exp(-100^2/2 \cdot 500^2)) = 3{,}92 \cdot 10^{-4}$ ч$^{-1}$;
- $\lambda(100) = 100/500^2 = 4 \cdot 10^{-4}$ ч$^{-1}$;
- $T_{ср} = 500\sqrt{1{,}57} = 626$ ч.

Повышение надежности ЭА резервированием

Резервирование — способ повышения надежности аппаратуры, заключающийся в дублировании (иногда и многократном) ЭА в целом или отдельных ее модулей или элементов. Различают следующие виды резервирования: *постоянное* (резервные элементы включены вместе с основным и функционируют в тех же режимах); *резервирование замещением* (обнаружение отказавшего элемента и замена его резервным); *скользящее резервирование* (любой резервный элемент может замещать любой отказавший).

Если $P_c(t)$ — вероятность безотказной работы системы (модуля), то установка и включение параллельно нескольких таких же систем (модулей) приводит к увеличению результирующей вероятности безотказной работы резервированной системы $P_c^p(t)$, которую можно определить из

$$P_c^p(t) = 1 - \left[1 - P_c(t)\right]^{m+1},$$

где m — число включенных параллельно основной системе (модулю) резервных.

Пример. Система, имеющая вероятность безотказной работы 0,7, при включении одной резервной повысит вероятность безотказной работы до 0,91, а двух — до 0,973.

В ЭА применяется *общее*, когда резервируются отдельные модули ЭА, и *поэлементное* резервирование, когда резервирование осуществляется на уровне микросхем или отдельных элементов. При одинаковом количестве резервных элементов поэлементное резервирование эффективнее общего, но требует большого числа дополнительных электрических связей.

Резервирование, хотя и может дать значительный положительный эффект, реально трудно реализовать из-за требований разработки дополнительных схем по обнаружению отказов, введению разнообразных переключателей при установке резерва, что приводит к увеличению стоимости аппаратуры, ее объемов и массы. Практически резервирование при разработке вычислительных систем общего назначения не используется.

Расчет надежности ЭА

Определив из ТЗ требуемую вероятность безотказной работы аппаратуры, конструктор распределяет эту вероятность по составляющим ЭА модулям, подбирает элементы с необходимыми интенсивностями отказов, выявляет потребность и глубину резервирования, принимает меры по защите аппаратуры от воздействий дестабилизирующих факторов.

Расчет надежности ЭА состоит в определении числовых показателей надежности $P(t)$ и $T_{ср}$ по известным интенсивностям отказов комплектующих ЭА элементов. При этом считается, что, если выход из строя любого элемента приводит к выходу из строя всей ЭА, то имеет место последовательное включение элементов. Усредненные данные по интенсивностям отказов микросхем, электрорадиоэлементов, узлов и электрическим соединениям приведены в табл. 4.14.

При конструировании необходимы данные об ожидаемых изменениях характеристик элементов в течение всего срока службы ЭА. Например, если разрабатывается аппаратура со сроком службы 10 лет, то необходимо предварительно в течение 10 лет, если не используется какой-либо метод ускоренных испытаний, собирать данные об изменении параметров комплектующих элементов, что в общем случае нереально, так как за это время может устареть как элементная база, так и сама разрабатываемая ЭА.

Таблица 4.14. **Интенсивности отказов комплектующих и электрических соединений**

Элемент	Интенсивность отказов, $\lambda \cdot 10^{-6}$ 1/ч
Микросхемы в пластмассовом корпусе	0,1
Микросхемы в керамическом корпусе	0,01
Маломощные транзисторы	0,05
Мощные транзисторы	0,5
Маломощные диоды	0,02
Мощные диоды	0,2
Углеродистые резисторы	0,01
Проволочные резисторы	0,5
Регулируемые резисторы	2,0
Конденсаторы танталовые	0,02
Конденсаторы электролитические	0,2
Кристалл кварца	0,05
Переключатели	0,2
Реле	0,5
Вентиляторы	2,0
Трансформаторы	0,5
Пайка ручным способом	0,2
Пайка автоматическим способом	0,002
Разъемный контакт	0,05
Соединение «под винт»	0,08
Соединение накруткой	0,0012
Соединение сваркой	0,0006
Соединение обжимкой	0,006

Поэтому трудно ожидать совпадения реального и рассчитанного поведения системы, но расчеты надежности необходимо выполнять, так как в ТЗ на разработку всегда указываются требуемые показатели надежности.

Вероятность безотказной работы системы будет

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^{n}[1 - q_i(t)] = \prod_{i=1}^{n} P_i(t), \qquad (4.13)$$

где $q_i(t)$ и $P_i(t)$ — соответственно вероятность отказа и вероятность безотказной работы i-го модуля за время t; n — число модулей системы.

Из (4.8) и (4.13) получим

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^{n} \exp\left[-\int_0^t \lambda_i(t)dt\right] = \exp\left[-\sum_{i=1}^{n}\int_0^t \lambda_i(t)dt\right],$$

где $\lambda_i(t)$ — интенсивность отказов i-го модуля системы.

Обозначив $\sum_{i=1}^{n}\lambda_i(t) = \Lambda(t)$, получим $P_c(t) = \exp\left[-\int_0^t \Lambda(t)dt\right]$.

Модули одного иерархического уровня имеют приблизительно равную надежность. Тогда для системы из K групп модулей одного уровня

$$\Lambda(t) = \sum_{i=1}^{K} n_i\lambda_i(t),$$

$$P_c(t) = \exp\left[-\sum_{i=1}^{K} n_i \int_0^t \lambda_i(t)dt\right],$$

где n_i — число модулей i-го уровня иерархии.

Для экспоненциального закона распределения, когда интенсивность отказов можно считать величиной постоянной,

$$\sum_{i=1}^{K} n_i\lambda_i(t) = \Lambda(t) = \Lambda = \text{const},$$

$$P_c(t) = \exp(-\Lambda t).$$

В общем случае надежность конструкции зависит от соотношения прочности и устойчивости, закладываемых в конструкцию при разработке, к нагрузке, которую приходится выдерживать аппаратуре в процессе эксплуатации. Под прочностью здесь понимается способность аппаратуры выдерживать без разрушений внешние температурные, механические, влажностные и прочие воздействия, под устойчивостью — способность к работе при тех же воздействиях.

Создание аппаратуры без излишних запасов прочности — важная и сложная задача, поскольку конструктор не всегда имеет четкие количественные параметры внешних воздействий, отсутствуют или имеются неточные математические модели, позволяющие весьма ориентировочно произвести указанную оценку. Это приводит к внесению в конструкцию завышенных запасов прочности и устойчивости, так называемых *коэффициентов незнания*, уточнение которых — условие успешного обеспечения заданной надежности при минимальной себестоимости.

Контрольные вопросы

1. Назовите внешние воздействия на ЭА и основные факторы их влияния на снижение надежности.
2. Укажите основные способы отвода теплоты от аппаратуры.
3. Как оптимально ориентировать прибор с позиций теплосъема от его поверхностей, если боковая, лицевая и горизонтальная поверхности корпуса имеют отношение площадей как 1 : 2 : 3?
4. Причины воздействия на аппаратуру вибраций и ударов.
5. Как определяется собственная частота колебаний конструктивных элементов ЭА?
6. Назовите наиболее эффективные способы защиты аппаратуры от влажностных воздействий (воздействий пыли).
7. Как защищают ЭА от переохлаждения?
8. Для чего нужно знать характеристику аэродинамического сопротивления аппаратуры?

5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

5.1. Виды электрических соединений в ЭА

Под электрическими соединениями понимают *линии передачи* (ЛП) и электрические *контакты*, служащие для передачи сигналов и электрической энергии между МС, ЭРЭ, модулями, образующими ЭА.

По выполняемым функциям различают *сигнальные* ЛП, объединяющие входы и выходы элементов и модулей и предназначенные для передачи сигналов, и *электропитания*, осуществляющие подвод электрической энергии к элементам. В том и другом случае ЛП имеют обратный провод, называемый *землей (линией нулевого потенциала, общим проводом)*, по которому протекают возвратные токи сигнальных линий и линий электропитания.

В зависимости от конструктивных особенностей обратного провода ЛП подразделяют на:

- симметричные, состоящие из двух одинаковых изолированных проводов;
- несимметричные с одним общим проводом для многих ЛП;
- коаксиальные, представляющие собой два разных по конструкции цилиндрических проводника с совмещенными осями (обратный провод есть оплетка коаксиального кабеля).

Выделяют *неэкранированные* и *экранированные* ЛП. Экраны последних обеспечивают защиту линий от воздействия электрических, магнитных и электромагнитных полей.

Электрические соединения бывают внутри- и межмодульными, внутри- и межячеечными, внутри- и межблочными и т. п., что обусловливает их конструктивное исполнение.

Линии передачи должны обладать:

- минимальным активным и индуктивным сопротивлениями;
- однородным по длине линии волновым сопротивлением;
- минимальным полем вокруг линии при протекании по ней тока;

• способностью передавать электрические сигналы в широком диапазоне частот, токов и напряжений;

• минимальной толщиной изоляционного слоя провода с диэлектрической проницаемостью, близкой к единице;

• способностью к объединению в узлы;

• возможностью осуществлять коммутацию без механической поддержки;

• способностью к автоматизации при проведении монтажных работ.

Удовлетворить вышеперечисленным требованиям, используя какой-либо один тип ЛП, не представляется возможным. Поэтому в реальных конструкциях применяют разнообразные типы ЛП в зависимости от функциональных особенностей как ЛП, так и аппаратуры.

На выбор типа ЛП влияют форма передаваемых сигналов, их напряжение и частота, ослабление сигнала на единицу длины линии, механическая гибкость, технологические требования и некоторые другие факторы.

Радиоэлектронные и вычислительные средства содержат разнообразные по выполняемым функциям элементы и модули, отличающиеся характером обрабатываемых сигналов, их мощностью, частотой и пр. При передаче электрических сигналов по ЛП происходит искажение формы и спектра сигналов, их затухание. Искажение сигнала определяется степенью рассогласования параметров электронных схем с параметрами ЛП, взаимным влиянием расположенных по соседству ЛП, задержкой сигналов из-за конечного времени прохождения сигналов по ЛП. Линии передачи ограничивают мощность, передаваемую от источника электроэнергии, и рассеивают в окружающее пространство электромагнитную энергию.

Выбор конструктивно-технологического варианта исполнения электрических соединений — важная и сложная задача, в значительной степени влияющая на качество проектируемой ЭА.

Электрический сигнал передается по проводнику тока, которым является металлическая проволока (провод), пленочные и печатные проводники. В поперечном сечении провода бывают круглыми или прямоугольными, пленочные и печатные проводники — только прямоугольными. Провода защищаются изолирующими диэлектрическими оболочками, либо оболочками и экранами. По *волноводам* и *волоконно-оптическим ЛП* передается электромагнитная энергия радиочастотного (волновод) и светового (световод) диапазонов.

На рис. 5.1 приведены виды ЛП и конструктивные особенности их исполнения, если читать рисунок из любого места по направлениям стрелок. Например, существует конструктивное исполнение ЛП в виде прямоугольного неизолированного провода или многожильного круглого изолированного провода.

Для повышения производительности труда при сборке ЭА, упрощения электромонтажных работ ЛП объединяют конструктивно-технологически в

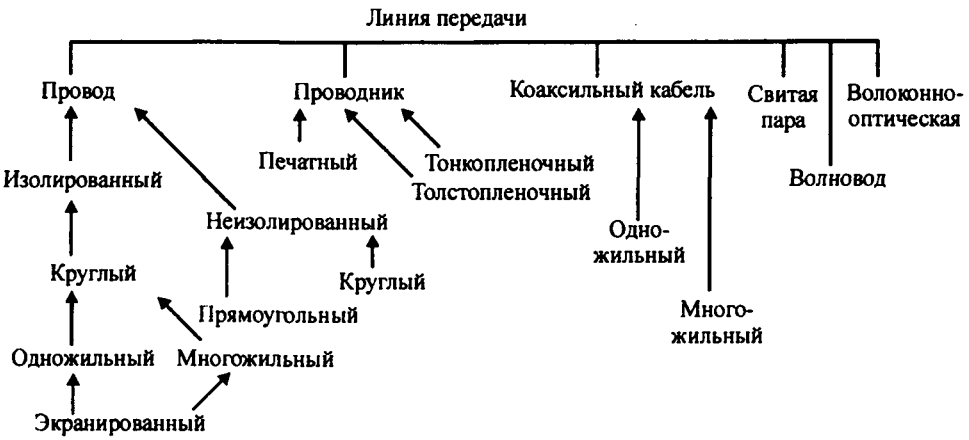


Рис. 5.1. Виды и конструктивные особенности линий передач

узлы (рис. 5.2), состоящие, например, в жгутах из нескольких десятков линий. Чтение рисунка из любого места по направлениям стрелок позволяет получить название узла объединения. Например, опрессованный плоский кабель или печатный узел объединения.

Линии электропитания представляют собой объемные провода, пленочные и печатные проводники, либо проводящие пластины. Конструктивное исполнение сигнальных ЛП более разнообразно и во многом определяется частотным диапазоном передаваемых сигналов. Лишь оценив характер искажения сигналов в ЛП, можно правильно ее применить.

Все сигнальные линии связи разделяют на *электрически длинные* и *электрически короткие*, характер искажения сигналов в которых различен.

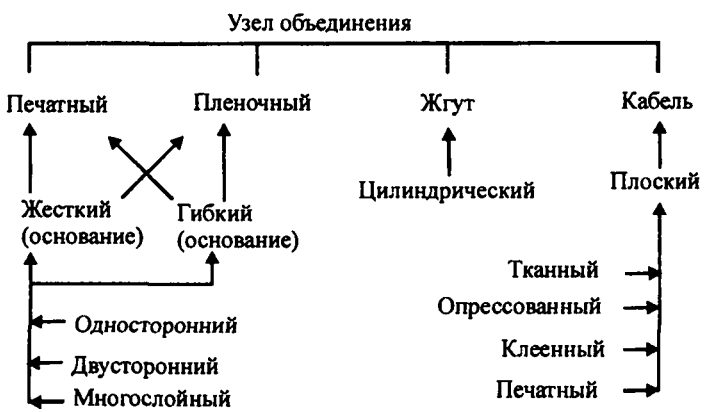


Рис. 5.2. Конструктивно-технологическое объединение линий передач

Электрически короткой (далее *короткой*) называют ЛП, длина которой $l_к$ для гармонического сигнала определяется по выражению

$$l_к \leqslant 0{,}1\lambda \leqslant c/(\sqrt{\varepsilon} f),$$

где λ, f — длина волны и частота сигнала; c — скорость света; ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды, окружающей линию передачи.

При разложении импульсного сигнала в спектр в нем следует выделить гармонику наибольшей частоты и для нее определить длину короткой линии (верхний предел частоты ориентировочно можно найти по формуле $f = 0{,}4/t_ф$, где $t_ф$ — минимальное значение фронта импульсного сигнала на уровне 0,1 и 0,9 амплитудного значения сигнала).

Длинную или короткую ЛП можно установить из соотношения фронта передаваемого импульса $t_ф$ и времени задержки прохождения сигнала по линии $t_з$. Если имеет место неравенство $t_ф / t_з \geqslant 2$, то ЛП электрически короткая, если же сохраняется соотношение $t_ф / t_з < 2$, то — электрически длинная.

Электрически короткие ЛП

При анализе электрических процессов короткую ЛП моделируют эквивалентной схемой, состоящей из емкости и индуктивности ЛП, либо только емкости, сосредоточенными в одной точке, а не распределенными по всей длине линии. При этом пренебрегают активным сопротивлением линии из-за малого его значения. На рис. 5.3, *а* показаны модули *1* и *2*, электрически соединяемые короткой ЛП. Модуль *1*, формирующий сигнал, представляется источником напряжения U с последовательно включенным сопротивлением R_1. Модуль *2* является приемником сигнала и моделируется сопротивлением R_2. Величины сопротивлений R_1 и R_2 цифровых схем зависят от состояния 0 или 1, в котором эти схемы находятся.

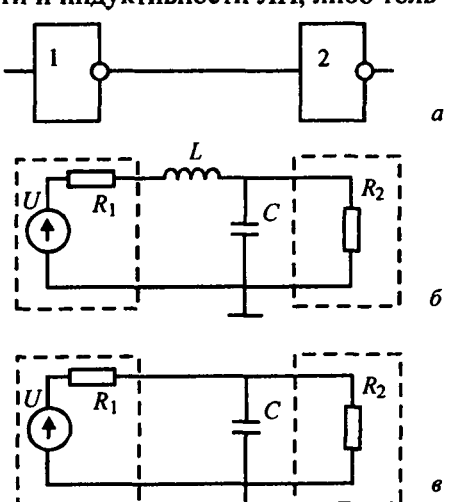


Рис. 5.3. Электрически короткая линия передачи (*а*), индуктивно-емкостная (*б*) и емкостная (*в*) расчетные схемы

Эквивалентную схему короткой линии (см. рис. 5.3, *б*) совместно с

сопротивлением R_1 (полагаем, что R_2 велико) представим резонансным контуром, в котором могут возникнуть колебания, действующие как помехи. Частота этих колебаний будет

$$f=\frac{1}{2\pi}\sqrt{1/(LC)-R_1^2/(4L^2)}.$$

В результате колебательного процесса изменяющееся напряжение может несколько раз пересечь порог срабатывания интегральной схемы (модуля *2* на рис. 5.3), что приведет к многократному изменению ее логического состояния.

Если колебания в ЛП прекратятся за минимальное время длительности фронта передаваемого по линии сигнала, то они не окажут влияния на работоспособность аппаратуры. Условие отсутствия колебаний в линии выполняется при $L \leqslant CR_1^2/4$. В этом случае индуктивностью линии можно пренебречь и рассматривать ЛП в виде емкостной схемы замещения (см. рис. 5.3, *в*).

Реакция ЛП на синусоидальный входной сигнал проявляется в уменьшении амплитуды выходного напряжения и изменении разности фаз между входным и выходным напряжением. Это приводит к зависимости напряжения на выходе линии от частоты входного сигнала.

В общем случае сигналы на входе и выходе ЛП могут существенно отличаться. Если ЛП нагружается на пороговые схемы, то при подаче на вход ЛП прямоугольного импульса амплитудой U время срабатывания схемы задерживается на величину

$$t_{ср} \geqslant \tau\left|\ln(1-U_{пор}/U)\right|,$$

где $\tau = R_1C$ — постоянная времени; $U_{пор}$ — пороговое напряжение логического элемента.

Если длительность импульса много больше τ, то ЛП передаст импульс практически без искажений. В противном случае линия передачи будет себя вести подобно интегрирующей RC-цепи. Поэтому импульс может *исчезнуть*, если его амплитуда не достигнет порогового напряжения логического элемента.

Перекрестные помехи обусловлены электрическим, магнитным и электромагнитным взаимодействием расположенных по соседству ЛП (рис. 5.4). Требования микроминиатюризации и, следовательно, увеличения плотности упаковки проводников ставят перед конструктором важную задачу уменьшения помех до уровней, не влияющих на точную и надежную работу аппаратуры.

Помехи на входе U_3 и выходе U_4 пассивной линии передачи ЛП2 от параллельно расположенной активной ЛП1, по которой передается сигнал (см. рис. 5.4, *а*), при $\left[CR_3R_4/(R_3+R_4)\right] \leqslant \leqslant t_ф/2{,}5$ можно представить в виде:

$$U_3 = C\frac{R_3R_4}{R_3+R_4}\frac{dU}{dt} + M\frac{R_3}{R_3+R_4}\frac{dI}{dt};$$

$$U_4 = C\frac{R_3R_4}{R_3+R_4}\frac{dU}{dt} - M\frac{R_4}{R_3+R_4}\frac{dI}{dt},$$

где R_1, R_3 и R_2, R_4 — соответственно выходные и входные сопротивления модулей; C, M — емкость и взаимная индуктивность между ЛП.

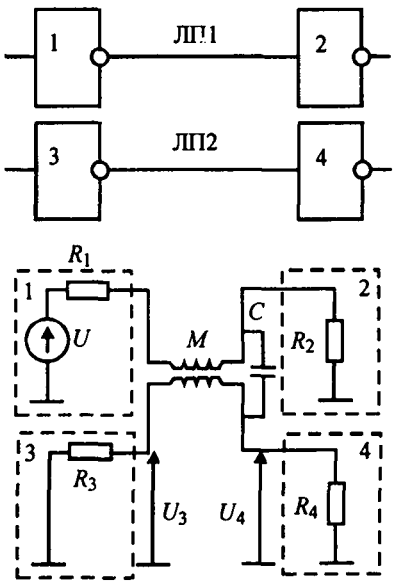


Рис. 5.4. Перекрестные помехи в коротких линиях передачи:

а — электрическая схема; *б* — расчетная схема

При выводе этих уравнений принято условие слабой взаимосвязи между линиями, что предполагает одностороннее влияние активной линии на пассивную и исключает обратное влияние. Распределенные параметры взаимной индуктивности и емкости линий заменены сосредоточенными, сопротивления утечки между линиями и сопротивления проводов не учитываются. Модуль *1* моделируется генератором напряжения U с $R_1 = 0$ ($I = U/(R_1+R_2)$). Принятые допущения правомерны для большинства практических случаев.

На рис. 5.4 модули, формирующие сигнал, расположены слева, приемные модули — справа. На входе приемного модуля *4* возникает помеха U_4, равная разности двух составляющих — емкостной и индуктивной. Если токи формирующих элементов имеют противоположное направление, а приемным элементом является модуль *3*, то на его входе окажется напряжение помехи, равное сумме емкостной и индуктивной помех.

Для импульсных сигналов с линейными фронтами приведенные выше выражения можно записать в следующем виде:

$$U_3 \approx C\frac{R_3R_4}{R_3+R_4}\frac{\Delta U}{t_ф} + M\frac{R_3}{R_3+R_4}\frac{\Delta I}{t_ф};$$

$$U_4 \approx C\frac{R_3}{R_3+R_4}\frac{\Delta U}{t_ф} - M\frac{R_4}{R_3+R_4}\frac{\Delta I}{t_ф},$$

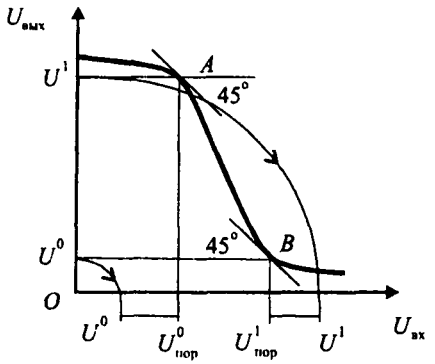


Рис. 5.5. Передаточная характеристика

где $\Delta U, \Delta I, t_ф$ — перепады напряжения, тока и длительность фронта импульса соответственно.

Помеха на входе и выходе пассивной линии включает емкостную и индуктивную составляющие, пропорциональные емкости C и взаимной индуктивности M. Анализ приведенных выражений позволяет сделать вывод, что емкостная составляющая возрастает с ростом скорости изменения напряжения на выходе модуля *1* и величин сопротивлений на концах пассивной линии, индуктивная помеха — с ростом скорости изменения ΔI, уменьшением суммы $R_3 + R_4$ и увеличением числа нагрузок на выходе активной линии.

Свойство переключательных схем не реагировать на помехи и функционировать при воздействии помех обеспечивается их *помехоустойчивостью,* которая определяется из *передаточной характеристики* (рис. 5.5).

Статическая помехоустойчивость — максимальная амплитуда помехи для напряжения высокого $U^1_{пом}$ и низкого $U^0_{пом}$ уровней, определяется из уравнений:

$$U^1_{пом} = U^1 - U^1_{пор}, \qquad U^0_{пом} = U^0_{пор} - U^0,$$

где $U^1_{пор}, U^0_{пор}$ — пороговые входные напряжения для логических уровней 1 и 0, при которых происходит переход в область неопределенного состояния логической схемы; U^1, U^0 — выходные напряжения логических уровней 1 и 0.

Точки A и B, а соответственно и напряжения $U^1_{пор}$, $U^0_{пор}$ и U^1, U^0, находятся на перегибах передаточной характеристики. Параметры статической помехоустойчивости микросхем приводятся в технических условиях.

Однако для нормального функционирования цифровых устройств необходимо гарантировать устойчивость их не только к статическим, но и динамическим помехам, когда учитывается не только амплитуда, но и длительность и форма импульса помехи.

Если вычисленное значение помехи превысит допустимую величину, то принимаются меры по уменьшению паразитных значений M и C. Снизить значение паразитной емкости между ЛП можно уменьшением длины совместного параллельного расположения проводов на минимально возможном

расстоянии друг от друга, увеличением зазора между ними, укладыванием проводов, передающих различные по уровням сигналы, в отдельные жгуты, приближением ЛП к земле (земля выполняет функцию экрана), введением экранированных проводов, использованием коаксиальных кабелей. Например, заземление оплетки коаксиального кабеля позволит целиком избавиться от емкостной помехи.

Ослабить взаимную индуктивность можно за счет разнесения ЛП возможно дальше друг от друга, уменьшением площадей контуров, образуемых проводами, по которым протекают прямые и обратные токи ЛП, использованием экранированных проводов, свитых пар, коаксиальных кабелей.

Электрически длинные линии передачи

Хотя параметры линии являются распределенными вдоль ее длины, на эквивалентной электрической схеме ЛП их аппроксимируют сосредоточенными, но на малом элементе (фрагменте) линии (рис. 5.6), где $R_п$, $L_п$, $C_п$ — погонные (на единицу длины) сопротивление, индуктивность, емкость. Сопротивление и индуктивность линии вводятся только в прямой провод, но с учетом сопротивления и индуктивности обратного провода.

Важнейшей характеристикой электрически длинной ЛП является ее *волновое сопротивление* Z_0, которое показывает, что электромагнитная волна, распространяющаяся вдоль линии, имеет отношение напряжение/ток, равное Z_0. Приближенно волновое сопротивление можно определить по выражению

$$Z_0 \approx \sqrt{\frac{L_п}{C_п}}.$$

При передаче сигналов по длинным линиям важно согласовать сопротивление нагрузки с волновым сопротивлением линии.

Отражение сигналов в длинных линиях. При передаче гармонических сигналов в несогласованной линии одновременно присутствует прямая волна, распространяющаяся от начала линии к ее концу, и обратная, пере-

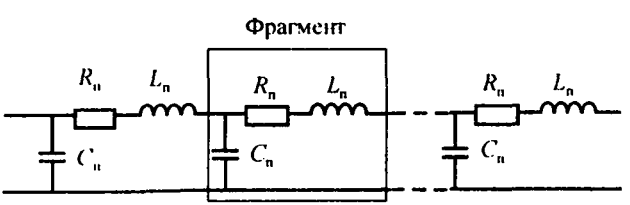


Рис. 5.6. Эквивалентная схема электрически длинной линии передачи

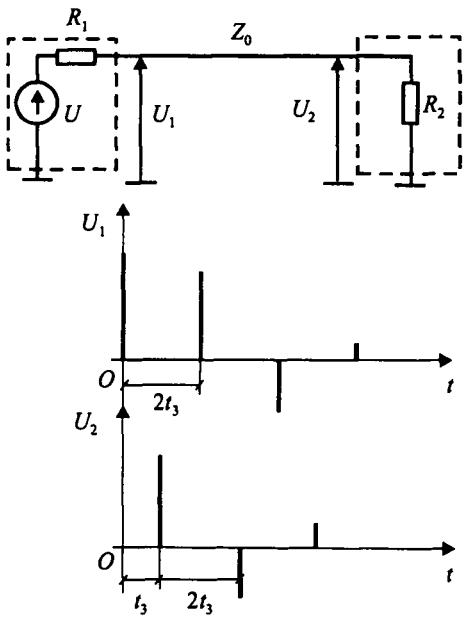


Рис. 5.7. Эквивалентная схема линии передачи и сигналы на входе и выходе линии при многократных отражениях

дающаяся от конца линии к ее началу. Обратную волну рассматривают как результат отражения прямой и называют *отраженной*, а прямую — *падающей*.

Отношение амплитуды напряжения отраженной волны U_0 к амплитуде волны падающей $U_п$ определяется выражением

$$\frac{U_о}{U_п} = \frac{R - Z_0}{R + Z_0} = \rho_о,$$

где $\rho_о$ — коэффициент отражения; R — сопротивление в начале или конце ЛП.

Если сопротивление в начале и конце линии соответственно R_1 и R_2 и соблюдается отношение $R_1 < Z_0 < R_2$, то коэффициенты отражений на входе $\rho_{о1}$ и выходе $\rho_{о2}$ линии соответственно будут $0 > \rho_{о1} > -1$ и $0 < \rho_{о2} < 1$.

Искажение импульсного сигнала, когда длительность передаваемого импульса $t_и << t_з$, при прохождении его по ЛП показано на рис. 5.7. Сигналы на графиках соответствуют моментам их поступления на вход U_1 и выход U_2 ЛП. Следует обратить внимание на изменение полярности отражаемых сигналов. Таким образом, на вход линии поступил один импульс, а на входе нагруженной на линию МС с периодом $2t_з$ оказывается несколько импульсов, от которых МС может менять свое состояние до тех пор, пока очередной импульс не окажется меньше ее порога срабатывания.

Согласование электрически длинных ЛП. Уменьшения или полного исключения отражений в длинных линиях можно добиться их согласованием. Линия передачи считается согласованной, если сопротивление, на которое она нагружена, равно волновому сопротивлению линии (рис. 5.8). Согласование ЛП обеспечивается использованием ЛП с высокой стабильностью волнового сопротивления и введением согласующих элементов.

Подключение согласующего резистора $R_с$ последовательно (см. рис. 5.8, *а*) с выходным сопротивлением передатчика сигнала (последовательное согласование) используется, если выходное сопротивление его много меньше Z_0 линии. В параллельно согласованной линии (см. рис. 5.8, *б*) резистор $R_с$ подсоединяют к входу приемника линии передачи. Способ согласования

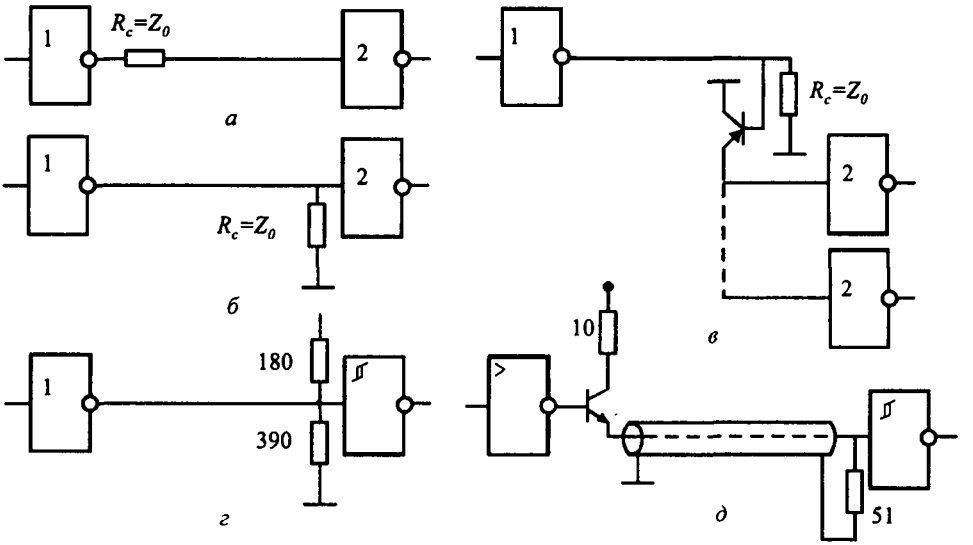


Рис. 5.8. Способы согласования электрически длинных линий передач

используют, если входное сопротивление приемника сигнала во много больше Z_0 линии. Поскольку падение напряжения на резисторах R_c понижает уровень передаваемого сигнала, режимы последовательного и параллельного согласования применяют, когда число элементов, нагружаемых на линию передачи, не более двух. При бóльшем количестве нагрузок для согласования используют эмиттерные повторители (см. рис. 5.8, *в*). При этом база и коллектор транзистора эмиттерного повторителя должны коммутироваться проводниками возможно меньшей длины.

При конструировании цифровой аппаратуры входы триггеров, одновибраторов, регистров не рекомендуется подключать непосредственно к длинным линиям. Отсутствие буферных каскадов из-за значительной емкостной нагрузки и наличия отражений приведет к неустойчивой работе аппаратуры. В качестве буферного каскада в ТТЛ МС используется триггер Шмитта (см. рис. 5.8, *г*, *д*). В схеме согласования коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом (см. рис. 5.8, *д*) кабель на выходе нагружен на сопротивление 51 Ом.

В зависимости от специфики разрабатываемой аппаратуры в качестве длинных линий используют микрополосковые и полосковые печатные проводники, свитую пару, плоский кабель, коаксиальный кабель.

При согласовании *свитой пары* (рис. 5.9) низкоомным согласующим резистором $R_c = Z_0$ передающий элемент линии должен формировать значительный выходной ток, который обеспечивается только работающими на

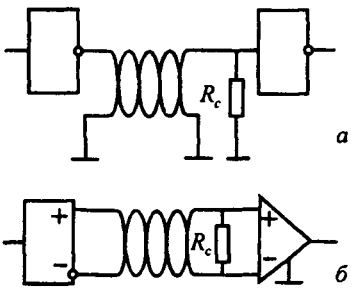


Рис. 5.9. Согласование свитой пары несимметричным (*а*) и симметричным (*б*) способом

линию формирователями. Для восстановления фронтов импульсов в качестве приемного элемента используют триггер Шмитта. Восприимчивость к внешним помехам является недостатком схемы, приведенной на рис. 5.9, *а*. При формировании разнополярного сигнала на обоих проводах свитой пары (см. рис. 5.9, *б*) этот недостаток устраняется.

Влияние поверхностного эффекта. Высокочастотный переменный или импульсный ток неравномерно распределяется по сечению проводника, имея наибольшую плотность у его поверхности, что является результатом проявления *поверхностного эффекта*. Поверхностный эффект увеличивает сопротивление проводника переменному току. При высоких частотах и быстродействии влияние поверхностного эффекта сказывается на искажении фронта и формы импульса, так как разные частоты затухают в материале проводника неодинаково.

Для ослабления влияния поверхностного эффекта используют провод, свитый из большого числа изолированных друг от друга жил и скрученных так, чтобы каждая последовательно занимала все положения в сечении вдоль провода.

Ослабление перекрестных помех в длинных линиях. Для устранения перекрестных помех линии передачи экранируют. Применение ЛП с экранирующей металлической оболочкой, соединенной с корпусом прибора, является эффективным способом ее защиты от воздействий электрического и электромагнитного полей.

На рис. 5.10 представлены две рядом расположенные ЛП с экранами, между которыми имеет место емкостная связь, представляющая, если не учитывать емкости оплетки на землю, последовательно соединенные емкости C_{10}, C_{20} и C_{00}. Из рисунка видно, что отсутствие заземления экранов ЛП

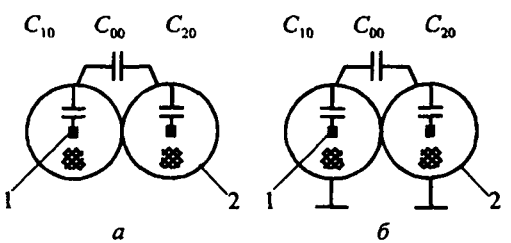


Рис. 5.10. Электрическое экранирование линий передач:

1 — центральный провод; *2* — оплетка (экран); C_{10}, C_{20} — емкость провод—экран первой и второй линий передач; C_{00} — емкость между оплетками (экранами)

не устраняет емкостную связь между центральными проводами. Заземление экранов приводит к разрыву паразитной емкостной связи.

Таким образом, защита от воздействий электрического поля сводится к использованию ЛП с экранами. Экраны необходимо заземлять короткими проводами минимального индуктивного сопротивления либо путем непосредственного контакта с корпусом прибора. Если ток, протекающий по центральному проводу ЛП, равен обратному току через его оплетку, то в пространстве, окружающем линию, электромагнитное поле отсутствует.

5.2. Конструкции сигнальных ЛП

Монтажные провода. Материалом токопроводящих жил проводов являются медь и ее сплавы. С уменьшением габаритов аппаратуры, уменьшением длин и диаметров монтажных проводов, а также ужесточением требований механических воздействий все большее применение стали находить медные сплавы, обладающие более высокой прочностью на разрыв, гибкостью при незначительных ухудшениях проводимости.

Монтажные провода бывают одно- и многожильными. Высокая гибкость, долговечность и надежность провода в условиях воздействий ударов и вибраций обеспечивается свиванием нескольких одиночных проводов в многожильный. Промышленность выпускает многожильный провод на 3, 7, 12, 17, 19, 27 и 37 круглых жил. Многожильный провод с суммарной площадью поперечного сечения токопроводящих жил, равной площади поперечного сечения одиночного провода, имеет несколько больший диаметр и стоимость, которые возрастают с увеличением числа жил. Повышение механической прочности многожильных проводов достигается введением в конструкцию провода центральной упрочняющей стальной жилки.

Защиту от электрического замыкания провода на корпус изделия (монтажную панель, несущую конструкцию) или на соседний провод осуществляют нанесением на токопроводящую жилу изоляционного покрытия. Материал и конструкция изоляции при минимальной толщине должны обеспечивать высокие значения электрических параметров (диэлектрическую прочность, сопротивление изоляции, диэлектрическую постоянную) в процессе и после приложения внешних воздействий, а также после длительного хранения. В настоящее время существует большое разнообразие различных типов изоляционных покрытий.

Провод выбирают исходя из требуемых условий эксплуатации, нагрузки по току, допустимого падения напряжения, утечки тока, диэлектрической прочности. Одножильные провода рекомендуется использовать в стационарной аппаратуре, не подверженной воздействиям ударов и вибра-

ций. Увеличение числа жил провода повышает его стойкость к многократным перегибам в условиях воздействий вибраций. Многожильные провода применяют в бортовой аппаратуре.

Можно рекомендовать следующий размерный ряд сечений токопроводящих жил монтажных проводов: 0,03; 0,05; 0,08; 0,12; 0,20; 0,35; 0,50; 0,75; 1,0; 1,5; 2,5 мм^2. Выбор диаметра провода зависит от протекающего тока и допустимого перегрева провода. Плотности тока для различных диаметров проводов при длительных допустимых токовых нагрузках, приводящих к перегреву провода на 20 °С относительно окружающей среды, приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1. **Допустимые токи нагрузки медных монтажных проводов**

Электрический параметр	Диаметр, мм									
	0,25	0,35	0,5	0,7	0,9	1,1	1,4	1,6	1,8	2,5
Плотность тока, А/мм^2	14	13	12	10	10	10	9	9	8	8
Ток, А	0,7	1,3	2,5	4	7	10	14	17	20	30

Из данных этой таблицы следует, что для проводов малых диаметров имеют место большие плотности токов за счет более активного теплообмена с окружающей средой.

Расчетные формулы для монтажных проводов:

- сопротивление $R = 1,27\rho l / d^2$;
- длина $l = 0,785 R d^2 / \rho$;
- допустимый ток $I = 0,785 j d^2$;
- падение напряжения $U = I\rho \frac{l}{s}(1 + \alpha \Delta t)$,

где ρ — удельное сопротивление материала провода (табл. 5.2), Ом · мм^2/м; d — диаметр провода, мм; l — длина провода, м; s — сечение провода, мм^2; j — плотность тока, А/мм^2; I — ток, А; α — температурный коэффициент сопротивления материала провода (см. табл. 5.2); Δt — перегрев провода, °С; U — напряжение, В.

Таблица 5.2. **Удельное сопротивление и температурные коэффициенты сопротивления металлов проводов**

Металл	Удельное сопротивление, Ом · мм^2/м	Температурный коэффициент материала провода, °С$^{-1}$
Бронза	0,08	0,004
Латунь	0,03...0,06	0,002...0,007
Медь	0,0175	0,004
Алюминий	0,028	0,004

В табл. 5.3 приведены наиболее широко используемые в ЭВМ марки монтажных проводов с указанием областей применения.

Таблица 5.3. **Марки монтажных проводов**

Провод монтажный	Марка	Рабочая температура, °С	Область применения
С волокнистой и полихлорвиниловой изоляцией	МШВ МГШВ МГШВЭ	–60 ... +70	Фиксированный внутри- и межприборный монтаж устройств, эксплуатируемых в полевых условиях
С полихлорвиниловой изоляцией	МГВ; МГВЭ МГВЛ; ПМВ ПМОВ ПМВГ	–60 ... +70	Фиксированный монтаж слаботоковой аппаратуры
С лавсановой изоляцией, теплостойкий	МГТЛ МГТЛЭ	–60 ... +150	Фиксированный и гибкий внутриприборный монтаж
Малых сечений	МГТФ МГСТФ МГТФЭ	–60 ... +70	Монтаж слаботоковой аппаратуры
С полиэтиленовой изоляцией повышенной теплостойкости	ПМП ПМПЭ ПМПЛ	–60 ... +220	Внутри- и межприборный монтаж

Печатные проводники. В низкочастотной аппаратуре узкие плоские сигнальные проводники ПП располагают на диэлектрическом основании совместно с проводниками электропитания и нулевого потенциала, которые для уменьшения падения напряжения на них выполняются широкими, насколько это возможно. Одно- и двусторонние ПП не обеспечивают для всех проводников однородного и стабильного волнового сопротивления, поскольку сигнальные проводники располагаются на разных расстояниях от проводника нулевого потенциала. Между проводниками имеет место значительная емкостная и индуктивная связь.

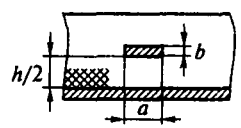
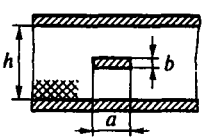
В высокочастотной аппаратуре уменьшение паразитной связи между проводниками достигается введением в конструкцию платы экрана, заземление которого обеспечивает также и одинаковые значения волновых сопротивлений сигнальных проводников. Экран является общим для всех проводников платы и выполняется в виде одного или нескольких проводящих слоев многослойной ПП. Функцию экрана в многослойных платах часто выполняет сплошной слой электропитания.

Расчетные соотношения для основных электрических параметров печатных проводников приведены в табл. 5.4. В первой строке таблицы показан эскиз микрополосковой, во второй — полосковой ЛП. При расположении проводников на границе двух диэлектриков, например плата — воздушная среда или плата — лаковое покрытие, можно использовать расчетные соотношения первой строки таблицы, вычислив ε по приближенной формуле

$$\varepsilon = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)/2,$$

где ε_1, ε_2 — относительная диэлектрическая проницаемость сред, на границе которых располагается проводник.

Таблица 5.4. **Электрические параметры печатных проводников**

Эскиз	Волновое сопротивление, Ом	Емкость, пФ/м	Индуктивность, мкГн/м
	$\frac{377}{\sqrt{\varepsilon}\left[1+\frac{2h}{\pi a}\left(1+\ln\left(\frac{\pi a}{h}\right)\right)\right]}$	$\frac{4{,}3\varepsilon}{\lg\left(\frac{5{,}7h}{a+b}\right)}$	$1{,}25\frac{h}{a}$
	$\frac{138}{\sqrt{\varepsilon}}\lg\left(\frac{5{,}7h}{a+b}\right)$	$\frac{10{,}4\varepsilon}{\lg\left(\frac{8h}{a}\right)}$	$1{,}06\lg\left(\frac{2{,}54h}{a}\right)$

Поскольку диэлектрическая проницаемость воздушной среды и лакового покрытия платы различны (у лакового покрытия выше), то волновое сопротивление микрополосковых линий, покрытых лаком, будет меньше, а емкость — выше.

Двухпроводная несимметричная ЛП с общим обратным проводом. У двухпроводной ЛП, в которой обратный ток протекает по общему для всех схем проводу, называемому *землей*, с возрастанием зазора между проводом и землей увеличивается индуктивность. Помеха обусловливается действием магнитного поля контуров связи соседних проводов, а также активных компонентов, создающих магнитные поля. На рис. 5.11, *а* наклонными стрелками условно изображено магнитное поле, пересекающее контур связи ЛП, а стрелкой на проводе — направление паразитного тока, наведенного этим магнитным полем. Индуцируемое напряжение помехи вычисляется по формуле

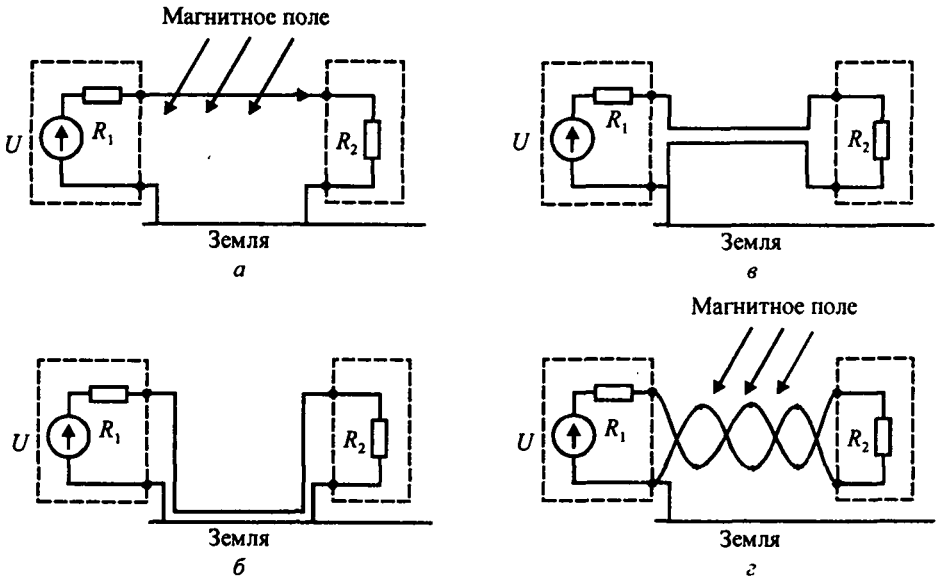


Рис. 5.11. Способы выполнения электрических соединений несимметричной (*а*, *б*) и симметричной (*в*, *г*) линиями передач

$$U = -10^{-8} SdB / dt,$$

где B — магнитная индукция, Тл; S — площадь контура связи, см^2.

Уменьшение паразитной связи возможно сокращением площади контура путем укладки провода непосредственно по поверхности земли (рис. 5.11, *б*), использованием симметричной двухпроводной ЛП (рис. 5.11, *в*). В последнем случае уменьшается индуктивность связи. Обратный провод двухпроводной ЛП в низкочастотных схемах должен заземляться в одной точке на входе или выходе линии связи во избежание появления контуров токов заземления и, как следствие, помехи из-за возможной разности потенциалов между точками заземления.

Свитая пара. Свитую пару получают переплетением между собой с определенным шагом двух изолированных проводов. Благодаря свиванию проводов вместо одного контура связи получается как бы несколько одинаковых по площади малых контуров. В представленной на рис. 5.11, *г* схеме соединения элементов свитой парой стрелками показаны наводимые внешним магнитным полем токи помех, имеющие в свитой паре противоположное направление и взаимно компенсирующиеся.

При свивании проводов снижаются электромагнитные связи между цепями и повышается их защищенность от взаимных и внешних помех. Для

ЛП с диаметром жил 0,9...1,2 мм шаг свивания должен быть 100...300 мм, для диаметров 0,3...0,8 мм шаг выбирают в пределах 40...90 мм. Для различных шагов свивания коэффициенты ослабления помех составляют следующие значения:

Шаг свивания, мм	100	75	50	25
Коэффициент ослабления, дБ	23	37	41	43

Индуктивность свитой пары ниже, чем индуктивность несимметричной двухпроводной ЛП.

Волновое сопротивление свитой пары вычисляется по формуле

$$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{(\varepsilon_в + \varepsilon_и)/2}} \lg(2d_и / d),$$

где $\varepsilon_в$, $\varepsilon_и$ — относительная диэлектрическая проницаемость воздуха и изоляции проводов; $d_и$, d — диаметр провода с изоляцией и без изоляции.

К недостатку метода монтажа свитой парой следует отнести увеличение массы и суммарной длины проводов вдвое по сравнению с несимметричной ЛП.

Свитая пара обеспечивает хорошую защиту передаваемых сигналов от влияния электромагнитных помех до частоты 100 кГц и удовлетворительную до частоты 10 МГц, гарантируя при этом постоянство волнового сопротивления.

Коаксиальный кабель. Улучшение помехозащищенности ЛП в высокочастотной аппаратуре обеспечивается применением коаксиальных кабелей (см. рис. 5.8, *д*). Коаксиальный кабель является двухпроводной ЛП, состоящей из внешнего трубчатого проводника (оплетки), внутри которого соосно размещается провод, разделенный диэлектрической средой от внешнего проводника.

Промышленность выпускает коаксиальные кабели с волновым сопротивлением от 50 до 3200 Ом и номинальным диаметром от 0,6 до 120 мм. Марка кабеля указывает на его тип, волновое сопротивление, диаметр, группу изоляции и нагревостойкости, порядковый номер разработки. Например, марка кабеля РК-50-4-11 означает, что это — радиочастотный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом, диаметром 4 мм, обычной нагревостойкости 1 с порядковым номером разработки 1.

Коаксиальный кабель используют для передачи разнообразных сигналов в широком частотном диапазоне. Постоянство электрических параметров (волнового и активного сопротивления, шунтирующей емкости и т. п.), высокая защищенность от электрических и электромагнитных полей обусловливает широкое использование коаксиальных кабелей в вычислительной технике.

При межприборной коммутации низкочастотной аппаратуры оплетка коаксиального кабеля для предотвращения появления контуров заземления заземляется на одном конце через выводы электрического соединителя. Оплетка кабеля высокочастотной аппаратуры соединяется с линией нулевого потенциала в нескольких точках через интервал 0,25λ, где λ — длина волны передаваемого сигнала на самой высокой частоте. При протекании значительных токов по линии нулевого потенциала многоточечное заземление кабеля теряет свою эффективность и не должно использоваться.

В табл. 5.5 приведены основные марки коаксиальных кабелей, применяемых в ЭВМ, с указанием основных областей их применения.

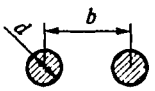
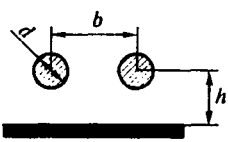
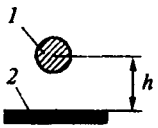
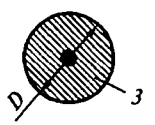
Таблица 5.5. **Основные марки коаксиальных кабелей**

Кабель	Марка	Рабочая температура, °С	Область применения
Радиочастотные со сплошной изоляцией	РК-50-2 РК-75-4 РК-100-7 РК-50-9 РК-75-9	–60 ... +70	Стационарная и передвижная аппаратура
Спиральные	РС-400-7 РС-1600-7	–60 ... +85	Элементы задержки импульсных сигналов
Радиочастотные теплостойкие малогабаритные	РКТ-72 РКТ-73	–60 ... + 125	Внутриблочный монтаж

Наличие оплетки коаксиального кабеля приводит к резкому возрастанию емкости прямого проводника на экран, что обязательно должно учитываться на этапе проектирования схем. Коаксиальные кабели имеют значительные габариты, сложны в монтаже и рекомендуются к использованию для внутри и межмодульной коммутации. Коаксиальные кабели должны быть согласованы с входными или выходными сопротивлениями коммутируемых элементов.

Электрические параметры объемного монтажа. Аналитические зависимости для оценки электрических параметров некоторых вырианов объемного монтажа представлены в табл. 5.6. В практике конструирования трудно получить волновое сопротивление ЛП ниже 30 и выше 600 Ом. В зависимости от конкретного типа провода и шага свивания волновое сопротивление свитой пары составляет около 110...130 Ом. При конструировании, например цифровой аппаратуры, стремятся разрабатывать и использовать ЛП с большим волновым сопротивлением и малой шунтирующей емкостью.

Таблица 5.6. **Электрические параметры вариантов объемного монтажа**

Эскиз	Волновое сопротивление, Ом	Емкость, пФ/м	Индуктивность, мкГн/м
	$\frac{276}{\sqrt{\varepsilon}}\lg(2b/d)$	$28\varepsilon/\lg(2b/d)$	$0{,}92\lg(2b/d)$
	$\frac{138}{\sqrt{\varepsilon}}\lg\left(\frac{4h}{d}\sqrt{1+\frac{4h^2}{b}}\right)$	$24{,}3\,\varepsilon\frac{\lg k}{\lg^2\frac{4h}{d}\lg^2 k}$; $k=\sqrt{b^2+4h^2}/b$	$0{,}46k$; $k=\sqrt{b^2+4h^2}/b$
	$\frac{138}{\sqrt{\varepsilon}}\lg(4h/d)$	$24{,}1\,\varepsilon/\lg(4h/d)$	$0{,}46\lg(4h/d)$
	$\frac{138}{\sqrt{\varepsilon}}\lg(D/d)$	$24{,}1\,\varepsilon/\lg(D/d)$	$0{,}46\lg(D/d)$

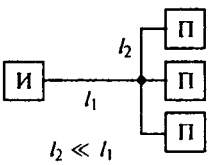
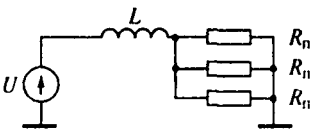
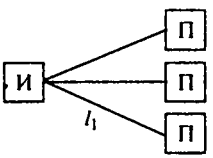
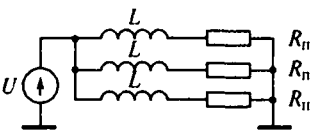
Примечание. 1 — провод; *2* — земля; *3* — оплетка коаксиального кабеля; ε — относительная диэлектрическая проницаемость внутренней изоляции кабеля; *D* — диаметр коаксиального кабеля без учета удвоенной толщины оплетки с изоляцией; *d* — диаметр провода.

Разводка ЛП. Разводка ЛП осуществляется последовательно и параллельно (табл. 5.7). Сравнение типов разводок проводится по суммарной длине соединений, быстродействию, надежности соединений, развязки.

Последовательная разводка обеспечивает минимальные длины связей, легкость в проектировании и монтаже. Недостатком является наличие цепей, по которым текут суммарные токи приемников П, вызывающие значительные падения напряжения на проводниках и, как следствие, гальваническую помеху. Отказ одного контакта или проводника приводит в худшем случае к отказу всех схем, нагруженных на источник сигнала И.

При параллельной разводке имеет место наилучшая развязка цепей. Отказ одного проводника или контакта скажется на работоспособности только одного приемника П. Однако суммарная длина проводников монтажа увеличится. Наличие параллельных цепей связи ведет к перекрестным помехам.

Таблица 5.7. **Виды разводки линий связи**

Тип разводки	Функциональная схема	Эквивалентная схема	Время задержки
Последовательная			Около $3L/R_п$
Параллельная			Около $L/R_п$

В табл. 5.7 представлено сравнение последовательного и параллельного способов разводки по быстродействию. Приведенные схемы и допущения упрощают выводы и дают качественную картину процессов. Предполагается, что источник сигнала И удален от приемника сигнала П на расстояние l_1, приемники расположены друг от друга на расстоянии l_2. Если $l_2 << l_1$, то индуктивностью ЛП между приемниками П можно пренебречь, емкостью линий передач также пренебрегаем. Источник сигнала в эквивалентной схеме представлен источником напряжения U, приемник — активным сопротивлением $R_п$. Последовательная разводка увеличивает задержку сигнала в 3 раза по сравнению с параллельной разводкой (на данном примере).

5.3. Волоконно-оптические ЛП

Использование принципиально нового конструктивного решения техники соединений — многожильных волоконно-оптических кабелей — позволяет значительно уменьшить объем и массу электрических соединений, повысить их радиационную стойкость, исключить влияние перекрестных помех. Основу волоконно-оптической ЛП составляет оптический кабель — *световод,* представляющий (рис. 5.12) двухслойную конструкцию, состоящую из проводящей среды (сердцевины) и оболочки, с разными показателями коэффициентов преломления.

Передача светового сигнала происходит из-за преломления и многократного полного отражения энергии сигнала при переходе из среды с одним коэффициентом преломления в среду с другим коэффициентом пре-

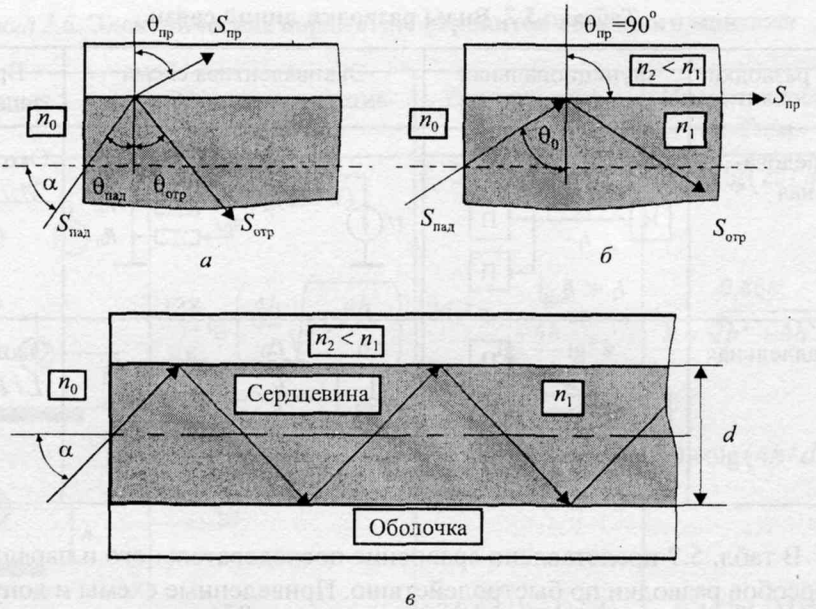


Рис. 5.12. Схема распределения и траектория распространения оптического сигнала в световоде

ломления. На рис. 5.12, *а* электромагнитная волна $S_{пад}$, падая на границу двух диэлектрических сред под углом $\theta_{пад}$, частично отражается ($S_{отр}$) от границы раздела под углом $\theta_{отр}$ и частично преломляется ($S_{пр}$) под углом $\theta_{пр}$. При этом соблюдается соотношение $n_1 \sin\theta_{пад} = n_2 \sin\theta_{пр}$, где n_1, n_2 — коэффициенты преломления соответственно сердцевины и оболочки.

С увеличением угла $\theta_{пад}$ возрастает угол $\theta_{пр}$ и при $\theta_{пад} = \theta_o$ становится равным 90°, а преломленный световой сигнал скользит вдоль границы раздела сред (см. рис. 5.12, *б*). При всех значениях $\theta_{пад} > \theta_o$ преломленная волна будет отсутствовать. Угол $\theta_o = \arcsin(n_1 / n_2)$, при котором световая энергия зигзагообразно распространяется по сердцевине световода (рис. 5.12, *в*), называют *углом полного внутреннего отражения*.

Угол полного внутреннего отражения определяет условие падения светового сигнала на торец световода. Если на торец световода из окружающей среды с коэффициентом преломления n_0 падает сигнал под углом α с коэффициентом преломления n_1 к оси сердцевины, то при определенном угле падения $\alpha = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_0}\cos\theta_{max}\right)$ сигнал будет полностью отра-

жаться от границы раздела сред сердцевина—среда. Для воздушной среды ($n_0 = 1$) получим $\sin\alpha_{max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$. Угол α_{max} между оптической осью и одной из образующих светового конуса, при котором выполняется условие полного внутреннего отражения, называется *апертурой*. Большая апертура позволяет воспринимать и передавать максимум энергии от источника с большим углом излучения светового потока. Однако при угле α_{max} появятся искажения, так как часть световой энергии передается по сердцевине, часть по оболочке и некоторая часть окажется в окружающем пространстве. Это приводит к расширению и некоторому ослаблению выходного сигнала световода (рис. 5.13). Кроме того, сигнал на выходе оказывается задержанным на величину $t_з$ за счет конечного времени прохождения по световоду.

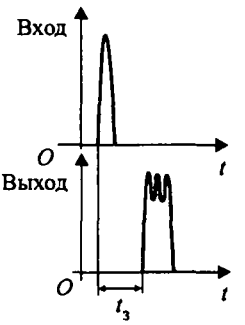


Рис. 5.13. Задержка и искажение сигнала на выходе световода

Между углом полного внутреннего отражения θ_0 и апертурным углом падения луча α_{max} существует взаимосвязь: чем больше θ_0, тем меньше α_{max}. Поэтому необходимо стремиться, чтобы угол входа луча в световод укладывался в апертурный угол α_{max}, а угол падения луча на границу сердцевина—среда был больше угла полного внутреннего отражения θ_0.

Длина волны передаваемого по световоду сигнала связана с диаметром сердцевины выражением $\lambda = d\cos\theta_{пад}$. Учитывая, что $\cos\theta_{пад} = \sqrt{1 - \sin^2\theta_{пад}}$ и $\sin\theta_{пад} = n_2/n_1$, получим

$$\lambda_{кр} = d\sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}, \quad f_{кр} = c/\lambda_{кр},$$

где $\lambda_{кр}$ и $f_{кр}$ — критическая длина волны и частота передаваемого по световоду сигнала; c — скорость света.

При $\lambda_{кр}$ имеет место режим стоячей волны, когда энергия рассеивается в окружающее пространство и по световоду не передается. При частотах выше критических энергия поля концентрируется внутри сердцевины и эффективно передается по световоду. Таким образом, в световоде могут лишь распространяться сигналы с длиной волны $\lambda < d$, а световоды ведут себя как высокочастотные фильтры.

В волоконно-оптической ЛП (рис. 5.14) оптическая энергия от светодиода *1* за счет полного внутреннего отражения передается по сердцевине *2*

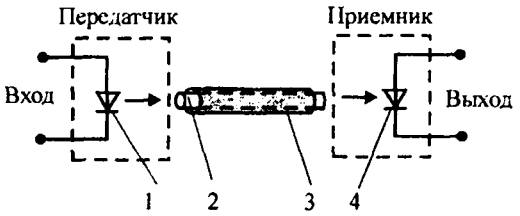


Рис. 5.14. Схема волоконно-оптической линии передачи:

1 — светодиод; *2* — сердцевина; *3* — оболочка; *4* — фотодиод

и воспринимается фотодиодом *4*, ослабляясь на величину $B = 20\lg(P_{вх}/P_{вых})/l$, где $P_{вх}$, $P_{вых}$ — мощность оптического сигнала на входе и выходе световода; l — длина световода. Ослабление увеличивается при наличии неоднородностей и искривлений световода и достигает максимума, если радиус изгиба становится равным 1/2 длины волны передаваемого сигнала. Однако для большинства материалов световодов ограничением на минимальный радиус изгиба (обычно около 50 мм) является не чрезмерное ослабление сигнала, а растрескивание материала световода. Ослабление для кварцевых световодов составляет не более 2 дБ/км при диаметре световода 200 мкм и радиусах изгиба 50 мм.

В качестве материала световодов используют полимеры, стекло, кварц. Световоды поставляются отрезками длиной до 100 м. Отрезки можно сращивать после шлифования торцов склеиванием, нагревом концевых частей и сращиванием под давлением, соединительными металлическими или пластмассовыми втулками, надеваемыми на концевые части сращиваемых отрезков.

Оптический кабель состоит из скрученных определенным образом световодов, заключенных в общую защитную оболочку (рис. 5.15, *а*). По конструктивному исполнению многожильные волоконно-оптические кабели разнообразны и отличаются числом и формой укладки световодов, способом объединения в единую конструкцию, защитой от внешних воздействий. Каждый световод покрывается одно- или двухслойной защитной оболочкой *3*. Внешняя защитная оболочка *4* (рис. 5.15) объединяет световоды в единую жесткую конструкцию, обеспечивая защиту от внешних воздействий. Центральная металлическая жила — провод *2* придает оптическому кабелю дополнительную жесткость.

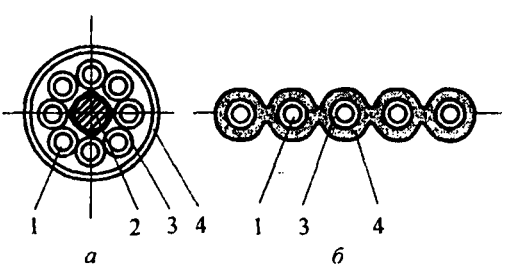


Рис. 5.15. Конструкция цилиндрического (*а*) и плоского (*б*) оптического кабеля:

1 — световод; *2* — провод; *3* — защитная оболочка световода; *4* — защитная оболочка кабеля

5.4. Конструирование линий электропитания

Электроэнергия от источника к потребителям подводится двумя проводами — потенциальным и нулевым. Как правило, сложная аппаратура требует нескольких источников вторичного электропитания (ИВЭП). Потенциальные провода всех ИВЭП называются линиями электропитания и выполняются в виде индивидуальных проводов, нулевые провода в большинстве случаев объединяют и выполняют в виде одного мощного провода или металлического листа.

Основные схемы распределения электропитания приведены на рис. 5.16. Сравнение и выбор схем проводится по падению напряжения, нагрузочной способности по току, легкости проведения электромонтажных работ и некоторым другим факторам.

Электропитание по схемам последовательной и петлевой разводки подводится гибкими одно- и многожильными проводами, подсоединяемыми к выводам питания потребителей электроэнергии (ПЭ). Преимуществом этих схем разводки является простота конструкции, легкость в проектировании и монтаже, необходимость в двух коммутационных выводах ПЭ для каждого питающего компонента (подводящего и отводящего). Основные недостатки первых двух способов разводки — наличие контура в петлевой схеме разводки и в связи с этим помехи от магнитного поля.

Точечную разводку осуществляют жестким проводом и системой гибких проводов, с одного конца подпаиваемых к жесткому проводу, а с друго-

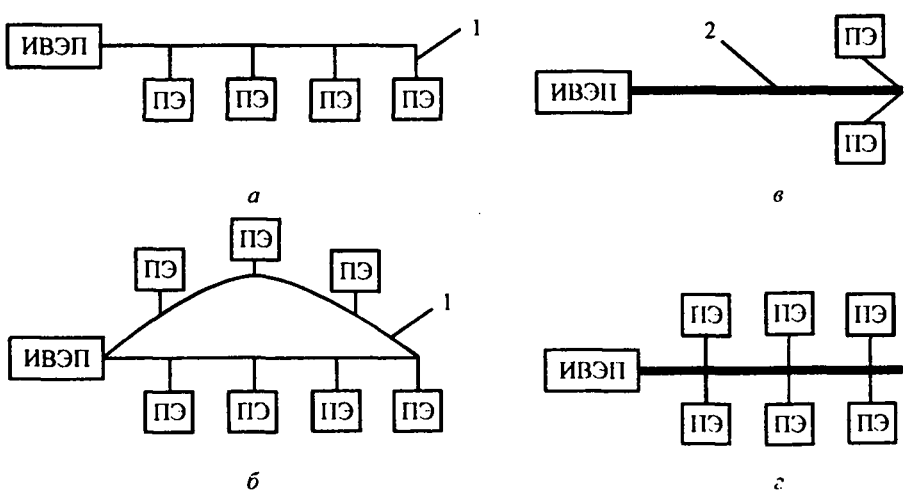


Рис. 5.16. Последовательная (*а*), петлевая (*б*), точечная (*в*) и параллельно-последовательная(*г*) схемы распределения электропитания:

1 — гибкий объемный провод; *2* — жесткая шина

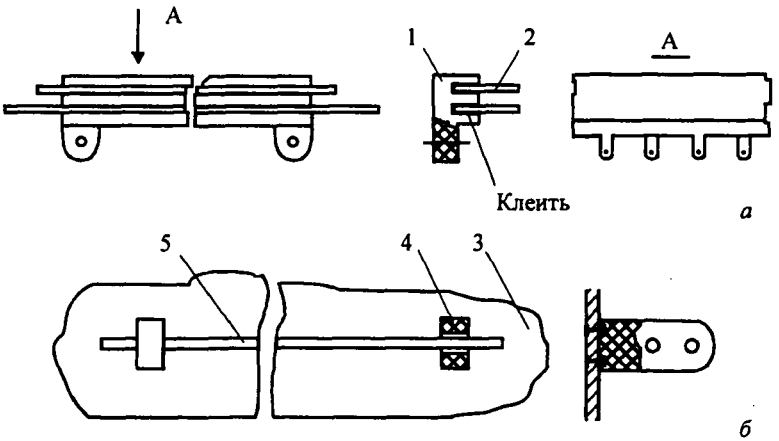


Рис. 5.17. Эквивалентная схема для расчета падения напряжения на линии электропитания

го — к ПЭ. Параллельно-последовательную разводку рекомендуется применять при регулярном расположении ПЭ. Как и при точечной разводке, суммарные токи протекают по мощной линии электропитания с большой площадью поперечного сечения.

В точечной и параллельно-последовательной схемах разводки линии электропитания и нулевого потенциала выполняют в виде единой конструкции, состоящей из двух медных проводников или проводов круглого сечения, защищенных от короткого замыкания изолирующими пластинами или воздушным промежутком (рис. 5.17). Фиксацию проводников осуществляют установкой на клей, круглых проводов — нанесением на концевые части цилиндрической поверхности припоя паяльником.

К недостаткам точечного и параллельно-последовательного способов разводки следует отнести появление перекрестных помех из-за индуктивной связи между гибкими проводами, ненадежность при перепайке.

В сложной ЭА из-за ограничений на конструкцию одновременно можно использовать несколько вариантов разводки электропитания, если подобный подход позволит улучшить электрические параметры, упростить монтаж, повысить ремонтопригодность.

Падение напряжения на линиях электропитания. Рассчитаем падение напряжения на линии электропитания (рис. 5.18). Для этого введем следующие допущения. Полагая токи ПЭ независящими от изменения напряжения электропитания, представим ПЭ приемником тока, что правомерно для электронно-вычислительной аппаратуры, разрабатываемой на микросхемах, имеющими допуск по питающему напряжению в 5...10 %. Расчет проведем как

для последовательной (сплошная линия), так и петлевой разводки (добавляется штриховая линия). Для упрощения будем считать, что токи приемников электропитания $I_{пэ}$ равны, а также равны и сопротивления ΔZ участков линии, между которыми подсоединяются ПЭ. Без учета падения напряжения на линии нулевого потенциала, падения напряжения на линии электропитания:

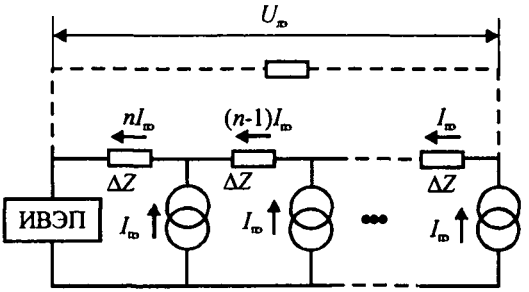


Рис. 5.18. Узлы подвода электропитания:

1 — корпус узла; *2* — проводящая пластина с контактными лепестками; *3* — монтажная панель; *4* — кронштейн; *5* — провод

$$U_{лэ} = I_{пэ}\Delta Z(1+2+...+n) = I_{пэ}\Delta Zn(n+1)/2,$$

где n — число ПЭ.

Эквивалентная схема петлевой разводки представляет собой последовательную схему, в которой между начальной и конечными точками линии введено сопротивление ΔZ. Петлевая разводка по сравнению с последовательной разводкой приводит к уменьшению падения напряжения в худшем случае несколько меньше, чем вдвое.

В приведенном выше выражении произведение ΔZn есть сопротивление линии электропитания (ЛЭП). Полагая, что $\Delta Zn = Z_{п}l_{лэ}$, получим

$$U_{лэ} = I_{пэ}Z_{п}l_{лэ}(n+1)/2,$$

где $Z_{п}$, $l_{лэ}$ — сопротивление на единицу длины линии (погонное сопротивление) и длина ЛЭП.

Уменьшая сопротивление и длину ЛЭП, а также число подсоединяемых к линии ПЭ, можно снизить $U_{лэ}$ в любое число раз. Сделать меньшей длину линии можно микроминиатюризацией и соответствующей компоновкой аппаратуры, снижением числа ПЭ — введением в конструкцию нескольких линий, подсоединяемых к одному ИВЭП (рис. 5.19). Другой путь уменьшения падения напряжения на линии электропитания — уменьшение сопротивлений ΔZ или $Z_{п}$.

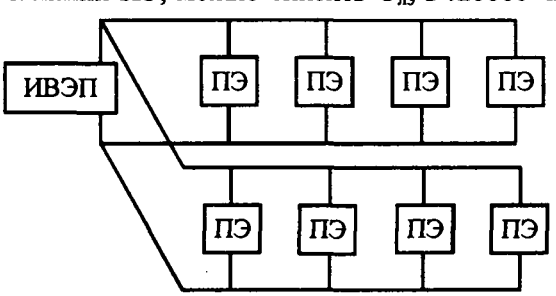
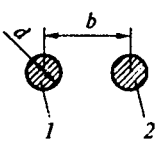
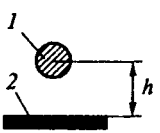
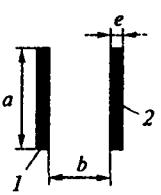


Рис. 5.19. Две линии электропитания от одного ИВЭП

В табл. 5.8 приведены три широко используемые схемы выполнения линий электропитания и нулевого потенциала, а также представлены зависимости для расчета их электрических параметров. Хотя полное сопротивление ЛЭП складывается из активной и реактивной составляющих, однако, уже на частоте 100 кГц активным сопротивлением можно пренебречь и рассматривать только индуктивную составляющую. Уменьшение индуктивности ЛЭП можно достигнуть увеличением размеров ее поперечного сечения. Однако подобный подход не всегда результативен. Например, медный провод длиной 200 мм и диаметром 0,1 и 0,2 мм обладает соответственно индуктивностью 330 и 210 нГн. Таким образом, во втором случае расходы меди увеличились в 400 раз, а индуктивность уменьшилась несколько более, чем в 1,5 раза.

Таблица 5.8. **Способы выполнения линий электропитания**

Эскиз	Волновое сопротивление, Ом	Индуктивность, мкГн/м
	$\frac{276}{\sqrt{\varepsilon}}\lg(2b/d)$	$0{,}92\lg(2b/d)$*
	$\frac{138}{\sqrt{\varepsilon}}\lg(4h/d)$	$0{,}46\lg(4h/d)$
	$\frac{120b}{a\sqrt{\varepsilon}}$	$0{,}92\lg\frac{b}{a+e}$

Примечание. 1 — линия электропитания; 2 — линия нулевого потенциала.

Меньшей индуктивностью при одинаковых геометрических размерах обладает провод, расположенный над землей, большей — провода круглого и прямоугольного сечений. Наибольшее волновое сопротивление имеет провод круглого, наименьшее — прямоугольного сечения. Для согласования с внутренним сопротивлением ИВЭП волновое сопротивление ЛЭП должно быть минимально возможным.

Падение напряжения на ЛЭП при последовательной и петлевой разводках быстро увеличивается с возрастанием числа ПЭ. Поэтому эти типы разводок, если токи ПЭ велики, а сопротивления линий сравнимы с сопротивлением нагрузки, применять не рекомендуется.

Развязывающий конденсатор, подсоединяемый к выходу источника непосредственно у ПЭ, является для ПЭ как бы индивидуальным источником питания и осуществляет его электропитание накопленной энергией. Требуемая емкость развязывающего конденсатора вычисляется по формуле $C_р \geqslant kt_ф^2 / L$, где k — кратность уменьшения падения напряжения на линиях электропитания и нулевого потенциала; $t_ф$ — наименьшая длительность фронта импульсного сигнала; L — суммарная индуктивность линий электропитания и нулевого потенциала. При расчете конденсатора определяют падение напряжения на линии электропитания и для обеспечения работоспособности ПЭ принимают решение об уменьшении этого напряжения в k раз. Для улучшения режима работы аппаратуры развязывающие конденсаторы с выводами минимальной длины устанавливаются у каждого ПЭ.

5.5. Конструирование заземления

В соответствии с правилами проектирования в схеме выделяют базу с нулевым потенциалом, относительно которой проводят отсчет всех электрических потенциалов схемы. Эту точку обычно называют *землей*. Конструктивно эта база выполняется проводом, проводником (шиной), металлической полосой или листом. Поскольку, как правило, аппаратуру заземляют, т. е. предварительно обеспечивают электрическое соединение металлического корпуса с реальной землей (почвой, грунтом), то для отличия реальной земли точку отсчета потенциалов схемы будем называть *схемной землей*.

Термин «земля» был установлен применительно к оборудованию, для которого в качестве обратного провода использовали почву. В настоящее время в качестве обратного провода используют не почву или металлический корпус ЭА, а провод (общий провод), который из соображений техники безопасности подсоединяют к земле.

По общему проводу протекают обратные (возвратные) токи электронных схем, вызывая на нем падение напряжения, и, следовательно, разницу в электрических потенциалах на общих выводах (земле) компонентов схемы. Поскольку по общему проводу функционирующей схемы протекают в каждый момент времени различные токи, то это приводит к появлению гальванических помех.

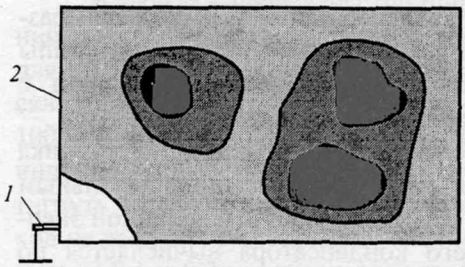


Рис. 5.20. Распределение электрического потенциала по сплошной земляной поверхности печатной платы:

– менее 2 мВ; – от 2 до 20 мВ; – от 20 до 100 мВ; – более 100 мВ

1 — штыревой контакт заземления; *2* — печатная плата

На рис. 5.20 приведен пример распределения потенциалов на сплошной заземленной поверхности ПП с заземлением в одной точке. Отметим, что электрический потенциал схемной земли в данном случае изменяется в пределах 2...100 мВ. Если компоненты схемы размещаются на поверхности платы с потенциалами менее 2 мВ и более 100 мВ (при проектировании схемы изначально предполагалось, что земляной слой платы имеет нулевой потенциал), то, например, для схемы усилителя, сигнал может заметно исказиться.

Сложная аппаратура с одним общим проводом функционировать не будет из-за появления на нем значительной гальванической помехи. При проектировании выделяют общие провода первичной и вторичной системы электропитания, высокочувствительных низкоуровневых схем, относительно нечувствительных мощных высокоуровневых схем, импульсных схем. Для уменьшения помех по земляным соединениям для различных подсхем системы используются несколько ИВЭП одинакового номинала каждый со своим общим проводом.

В небольших электронных системах, например, в микрокалькуляторе или радиоприемнике, получить низкоомный общий проводник относительно несложно. В сложных системах (большая ЭВМ, радар) сформировать низкоомную землю крайне трудно. Поскольку размеры сложных систем увеличиваются, то влияние взаимных индуктивностей и распределенных емкостей между общими проводами становятся заметными уже на низкой частоте. Поэтому в больших системах некоторая разница потенциалов на общих проводниках имеет место между различными частями системы и этот факт нужно принимать во внимание при проектировании защищенной от воздействия помех аппаратуры.

Общие провода электронных приборов объединяются по схемам одно- и многоточечного заземления (рис. 5.21, *а*). В первом случае общие провода модулей системы подсоединяются к общей нулевой точке, являющейся базой, относительно которой отсчитываются все потенциалы системы (см. рис. 5.21, *а*). Хотя в одноточечной земле связь модулей через общее сопротивление нулевого потенциала отсутствует (линия выродилась в точку), будет иметь место

влияние индуктивности L, а также связь через взаимные индуктивности M и емкости C, подсоединяемых к нулевой точке земляных проводов модулей. На высокой частоте паразитная емкость образует низкое, а индуктивность проводов — высокое сопротивление, что ухудшает свойства системы заземления. Для уменьшения взаимоиндуктивности общие проводники должны быть ориентированы взаимно перпендикулярно, что для большого числа элементов сделать практически невозможно.

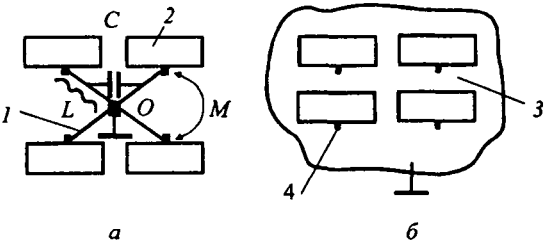


Рис. 5.21. Одно- (*а*) и многоточечное (*б*) заземление:

1 — провод; *2* — модуль; *3* — металлический лист; *4* — контактный лепесток

Земля высокочастотной аппаратуры чаще всего представляет собой проводящую плоскость (тонкий медный лист монтажной панели, фольга многослойной печатной платы), к которой модули по месту установки подсоединяются отводами минимальной длины (многоточечное заземление). Пользуясь графиком, приведенном на рис. 5.22, можно выбрать схему заземления, исходя из максимальной рабочей частоты системы и размеров общего провода l. В незаштрихованной области графика хорошие результаты даст использование как одно-, так и многоточечной схемы заземления.

Для предотвращения излучения проводником в окружающее пространство электромагнитной энергии длина проводника, м, должна быть $l \leqslant \lambda/50 \leqslant 6/f$, где λ — длина волны, м; f — частота, мГц.

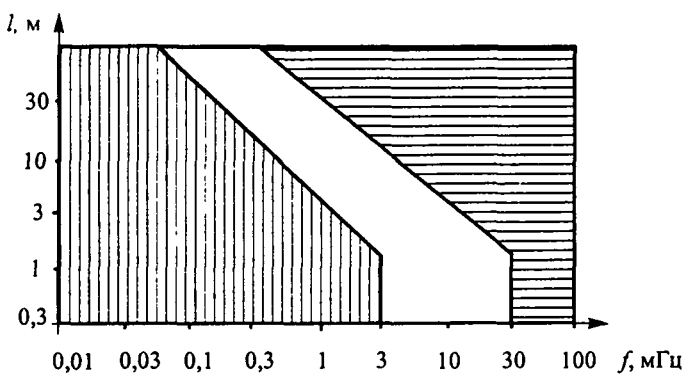


Рис. 5.22. Выбор схемы заземления:

 – одноточечное; – многоточечное

Сопротивление провода с учетом поверхностного эффекта, Ом, вычисляется по формуле

$$R_f = kR,$$

где R — сопротивление по постоянному току; k — коэффициент (табл. 5.9). Значение X определяется из выражения $X = 0{,}064\sqrt{f/R}$.

Таблица 5.9. **Значения коэффициента *k***

X	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0
k	1,00000	1,00032	1,00519	1,02582	1,07815
X	2,5	3,0	3,5	4,0	
k	1,17538	1,31809	1,49202	1,64051	

Заземление корпуса ЭА служит для предохранения обслуживающего персонала от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим деталям конструкции, а также для защиты ЭА от воздействия помех, создаваемых размещенным по соседству оборудованием. Заземлению не подлежит аппаратура, работающая при безопасном напряжении, имеющая двойную или усиленную изоляцию, а также надежный контакт с корпусом объекта установки.

Реальной землей летательного аппарата, судна на плаву является металлический корпус, при неметаллическом корпусе — магистральная шина заземления или металлические конструкции, имеющие надежное электрическое соединение между собой.

Заземление корпуса осуществляется системой проводов или одним общим проводом и обеспечивает электрическое объединение всех металлических элементов конструкции модулей, доступ к которым возможен при наладке, регулировке и ремонте, с *заземлителем*. Заземлителем называют проводник или систему проводников, выполненных из проводящего материала и находящихся в непосредственном соприкосновении с почвой, нейтралью первичной питающей сети, располагаемой обычно около фундамента здания, либо с внешней поверхностью фюзеляжа летательного аппарата, обшивкой судна и т. п. Заземление корпуса должно гарантировать сохранение потенциала нейтрали на элементах конструкции при нарушении изоляции провода распределительной системы электропитания и касания этим проводом металлических конструкций. Система блокировки при подобной ситуации отключает аппаратуру от питающего напряжения и защищает персонал от поражения электрическим током.

5.6. Электрические контакты в ЭА

В ЭА используются *временные, постоянные и полупостоянные электрические контакты*. К временным следует отнести разъемное и винтовое соединение, к постоянным — сварку, полупостоянным — паяное соединение, соединение накруткой и опрессовкой.

Разъемные соединения обеспечивают быструю установку и удаление элементов конструкции и используются для повышения ремонтопригодности аппаратуры.

Винтовое соединение является основным видом соединения проводов к электрическим машинам и приборам и позволяет коммутировать провода независимо друг от друга. Медные проводники малых сечений изгибают в кольцо под винт, а чтобы не расходились жилы многожильных проводов, пропаиваются или опрессовываются кольцевыми наконечниками. Материалы проводников и винта различны. Предотвращение возможного ослабления контактного давления при циклических температурных воздействиях и вибрациях возможно введением под винт пружинной шайбы или шайбы-звездочки.

Соединение пайкой осуществляется расплавленным припоем с температурой плавления ниже температуры плавления соединяемых проводников.

Сварочное соединение обладает высокой механической прочностью, способностью выдерживать циклические температурные воздействия, обеспечивает высокую плотность монтажа и рекомендуется для применения при разработке микроминиатюрной аппаратуры. При выполнении соединений сварочными токами можно повредить МС, диоды, транзисторы.

Соединение накруткой получают без разогрева материалов путем накручивания под натягом вокруг жесткого вывода нескольких витков одножильного провода. В сечении вывод представляет квадратную или прямоугольную форму с острыми углами. Материал вывода должен быть достаточно прочным, чтобы противостоять скручивающим усилиям, обладать хорошим сопротивлением на сминание накручиваемым проводом и низким омическим сопротивлением. Подобными свойствами обладают фосфористая и бериллиевая бронзы. В качестве материала проводника используется относительно мягкий и пластичный материал, сохраняющий форму накрутки. Соединение обеспечивает высокую надежность при жестких механических и климатических воздействиях. Основными причинами отказа соединения является ухудшение переходного сопротивления из-за коррозии соединения и появления усталостных явлений в накрученном проводе.

При опрессовке два провода со снятой с концевых частей изоляцией вводят в соединительную металлическую трубчатую гильзу, которая механически обжимается, в результате чего между проводами через гильзу будет

иметь место электрический контакт. Надежность соединения во многом зависит от соотношения размеров гильзы и диаметра провода, усилия обжатия и герметизации места соединения. Размеры и материал гильзы для каждого случая соединения тщательно подбираются экспериментально.

Сравнение способов выполнения электрических контактов проводится на основе анализа основных свойств и параметров контакта. Использование пайки и накрутки позволяет автоматизировать производство электромонтажных работ. Пайка и сварка обеспечивает высокую плотность монтажа. Сравнительная оценка способов контактирования, выполненная относительным методом, когда наилучшему соединению по определенному свойству присваивается единица, а наихудшему — четыре, приведена в табл. 5.10. За исключением быстроты выполнения соединений по всем прочим свойствам разъемный контакт и контакт «под винт» проигрывают постоянным и полупостоянным способам контактирования.

Таблица 5.10. **Оценка способов соединения электрических контактов**

Свойство контакта	Способ соединения			
	Сварка	Пайка	Накрутка	Обжимка
Механическая прочность	1	4	2	3
Размеры	1	2	3	4
Масса	1	2	3	4
Ремонтопригодность	4	1	2	3
Стойкость к вибрациям	1	2	3	4

В ЭА используют соединения многих разнородных материалов: серебро, палладий, золото — в контактах соединителей, медь и ее сплавы — для проводов, клемм, гнезд и штырей соединителей; оловянно-свинцовые припои в соединениях; цинк, никель, кадмий — для защитных покрытий крепежа и т. д. В местах соединений разнородных материалов возникают термоэлектрические потенциалы, зависящие как от материалов, так и температуры в соединении. Разница температур в различных частях конструкции может привести к погрешностям из-за наличия термоэлектрических потенциалов электрических соединений в высокочувствительных низкоуровневых схемах с высокими коэффициентами усиления. Основными принципами уменьшения погрешностей термоэлектрических потенциалов являются минимизация числа соединений, использование материалов с низкой термоэлектрической способностью. Наличие окислов на проводах, соединяемых накруткой, в значительной степени увеличивает термоэлектрическую способность соединений (до 0,9 мкВ/°С). Поэтому с проводов перед накруткой должны тщательно удаляться окислы.

Выбор электрических соединителей. Электрический соединитель должен выдерживать более жесткие внешние климатические и механические воздействия, чем аппаратура, в которую соединитель устанавливается. Запас по внешним воздействиям обеспечит его надежную работу в процессе эксплуатации. Чем больше контактов соединителя, тем меньше параметры надежности, приходящиеся на один контакт. Поэтому при отсутствии жестких ограничений на габариты и массу ЭА можно рекомендовать вместо одного устанавливать несколько соединителей с суммарным числом контактов, равным числу контактов внешних цепей изделия.

Цилиндрические соединители по сравнению с прямоугольными обеспечивают более надежную заделку жгута, имеют бóльшую надежность и стабильность параметров. Однако монтаж прямоугольных соединителей за счет линейного расположения выводов более удобен, габариты по сравнению с цилиндрическими соединителями с равным числом контактов меньше.

При конструировании аналоговой аппаратуры необходимо помнить, что в цепях с низкими уровнями сигналов существенное влияние на надежную работу ЭА оказывают помехи термоэлектрических потенциалов контактных пар.

Для конструктивных модулей всех уровней ЭА конструктор разрабатывает определенный способ коммутации. При этом, как правило, модули снабжаются соединителями, которые по назначению можно классифицировать как соединители разных уровней коммутации.

Коммутация на плате МС и ЭРЭ выполняется, как правило, паяными соединениями. Недостаток этого способа состоит в том, что для многовыводных компонентов затрудняется демонтаж, возникает необходимость в использовании специальной оснастки, например паяльников для групповой пайки. Улучшение ремонтопригодности и снижение эксплуатационных затрат возможно применением в конструкции соединителей первого уровня коммутации. Соединители МС распаиваются на печатной плате, затем в них устанавливают МС. Электрический контакт выводов соединителя с выводами МС обеспечивается за счет холодного контактирования металлов.

Соединители второго уровня коммутации обеспечивают электрическое соединение ТЭЗ между собой на шасси или объединительной печатной панели.

Соединители третьего уровня осуществляют коммутацию приборов, блоков, рам и стоек.

В зависимости от назначения различают соединители кабельные, приборно-кабельные и приборные. Кабельный соединитель служит для коммутации кабелей приборов. Вилочная и розеточная части соединителя не закрепляются на приборах, а фиксируются на кабелях. В приборно-кабельных соединителях один из элементов (обычно вилка) закрепляется на приборе,

вторым же элементом соединителя (розеткой) заканчивается кабель и фактически происходит коммутация кабеля с прибором. В приборных соединителях осуществляется коммутация частей приборов между собой. При этом вилка (или розетка) закрепляется на модуле, а ответная часть соединителя — на корпусе прибора. Фиксируемые на приборах соединители снабжаются фланцами или специальными элементами закрепления.

Соединение вилки с розеткой бывает *врубным, резьбовым и байонетным*. Врубное соединение обеспечивается простым вставлением вилки в розетку, иногда с фиксацией сочлененного состояния замком. Резьбовое соединение кабельных и приборно-кабельных соединителей выполняется резьбовой накидной гайкой, после завинчивания которой на требуемое число витков происходит коммутация и фиксация пар штырь-гнездо. Байонетное соединение обеспечивается пазом и выступом, вводимым в конструкцию вилки и розетки. При попадании выступа в паз и легком нажатии осуществляется скольжение выступа в пазе и западание (фиксация) в углубление.

Резьбовые соединители обеспечивают высокую надежность электрических соединений в условиях жестких механических воздействий. Накидная гайка соединителя предохраняется от самоотвинчивания проволокой малого диаметра. Врубное соединение позволяет быстро сочленять-расчленять соединитель, но такие соединители имеют низкую надежность в условиях воздействия ударов и вибраций. Байонетное соединение занимает промежуточное положение между врубным и резьбовым.

Корпус соединителя служит для закрепления на нем изолятора с контактами, защиты соединителя от внешних воздействий, в том числе и для защиты контактов соединителя от касания телом или одеждой, крепления соединителя к несущей конструкции модуля или кабеля к соединителю, а также фиксации сочлененного состояния. Корпус соединителя бывает прямой и угловой. Выбор формы корпуса определяется ориентацией частей прибора друг относительно друга. Правильный выбор корпуса может упростить эксплуатацию и уменьшить габариты прибора.

Соединитель выбирают исходя из назначения, предполагаемого способа монтажа (при этом фактически оговариваются требования к конструкции хвостовика контакта соединителя), необходимого числа коммутируемых цепей, электрических и электромеханических параметров, внешних климатических и механических воздействий, надежности, конструктивных особенностей соединителя.

К электрическим параметрам соединителей относятся максимальная рабочая частота, контактное сопротивление, рабочие токи и напряжения, сопротивление и электрическая прочность изоляции; к электромеханическим — усилие сочленения соединителя. Для удобства при эксплуатации усилие сочленения должно быть минимальным. Однако при воздействии

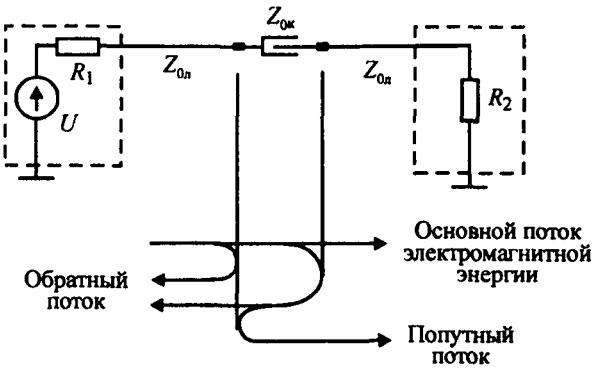


Рис. 5.23. Неоднородная линия передачи и потоки электромагнитной энергии в линии

ударов и вибраций возникает опасность изменения контактного сопротивления, появление виброшумов и шорохов на контактах, нарушение контакта.

Для аппаратуры низкого и среднего быстродействия из электрических параметров наиболее важными являются максимальные коммутируемые токи и напряжения. Однако при работе на высоких частотах возникает проблема согласования волновых сопротивлений коммутируемых цепей и контактных пар соединителей. Несогласованность приводит к искажению передаваемых сигналов, увеличению времени переходных процессов в цепях передачи сигналов.

Представленный на рис. 5.23 разъемный контакт с волновым сопротивлением $Z_{0к}$ соединяет в единую цепь две цепи линии передачи с волновым сопротивлением $Z_{0л}$. Данную ЛП следует рассматривать как неоднородную. Электромагнитная волна, распространяясь по линии и встречая неоднородности, частично отражается и возвращается к началу линии. Отражения приводят не только к ослаблению передаваемого сигнала. Обратный поток электромагнитной энергии затрудняет согласование линии передачи с нагрузкой, а попутный поток искажает форму передаваемого сигнала.

Интенсивность отказов электрического соединителя рассчитывается по формуле

$$\lambda = k_1 k_2 \lambda_{кп} + n_з \lambda_{ср},$$

где k_1, k_2 — коэффициенты, учитывающие соответственно влияние объекта установки и число задействованных контактных пар соединителя; $\lambda_{кп}$ — интенсивность отказов контактной пары; $n_з$ — число задействованных

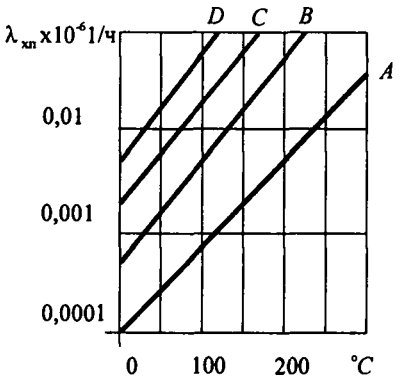


Рис. 5.24. Интенсивность отказов контактной пары соединителей:

A — –40...+250 °C; *B* — –40...+200 °C; *C* — –55...125 °C; *D* — –20...+100 °C

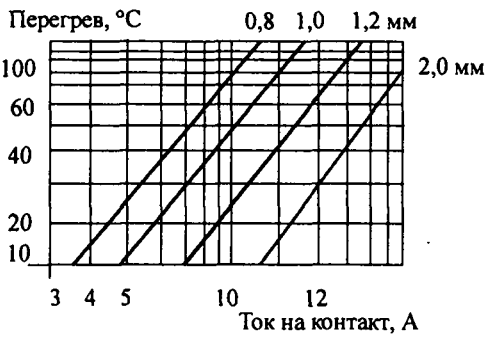


Рис. 5.25. Перегрев контактной пары в зависимости от тока и диаметра штыря

контактных пар соединителя; $\lambda_{ср}$ — интенсивность отказов с учетом числа $n_{ср}$ выполненных сочленений-расчленений соединителя.

Соединители в зависимости от рабочего температурного диапазона классифицируют по группам — *A*, *B*, *C* или *D*. По графику, приведенному на рис. 5.24, оценивается интенсивность отказов контактной пары $\lambda_{кп}$ соединителя в зависимости от температуры внутри изделия и с учетом нагрева контактной пары коммутируемым током (рис. 5.25).

Коэффициентами k_1 и k_2 корректируют $\lambda_{кп}$ в сторону увеличения в зависимости от объекта установки (табл. 5.11) и числа задействованных контактных пар соединителя

$$k_2 = \frac{n_з}{n}\exp\sqrt{0,1(n-1)},$$

где n — число контактных пар соединителя.

Таблица 5.11. **Коэффициенты влияния объекта установки на надежность электрических соединителей**

Оборудование, объект установки	Коэффициент k_1
Лабораторное и цеховое	1—10
Наземное возимое	5—15
Морское укрытое	5—15
Летательный аппарат	10—20
Спутник	15—30

Величина $\lambda_{ср}$, 1/ч, вычисляется из выражения

$$\lambda_{ср} = 0{,}001\exp(0{,}01n_{ср})10^{-6},$$

где $n_{ср}$ — *число сочленений-расчленений соединителя за 1000 ч эксплуатации.*

Пример. Рассчитать интенсивность отказов соединителя на 10 контактных пар (все контактные пары задействованы). Рабочий температурный диапазон соединителя *В*, диаметр штыря контакта 0,5 мм, ток на контакт 5 А. Соединитель устанавливается в наземную стационарную аппаратуру с температурой окружающей среды +25 °С. Предполагаемое число сочленений-расчленений соединителя 200.

Решение:

- изделие отнесем к лабораторному оборудованию;
- в худшем случае $k_1 = 10$ (см. табл. 5.11), $k_2 = \exp\sqrt{0{,}1(10-1)} = 2{,}58$;
- из графика, представленного на рис. 5.28, при токе на контакт 5 А перегрев штыря контактной пары диаметром 0,5 мм будет 18 °С, а температура контактной пары — 43 °С;
- из графика, изображенного на рис. 5.24, для соединителя группы В при температуре контактной пары в 43 °С $\lambda_{кп} = 0{,}0013 \cdot 10^{-6}$ 1/ч;
- $\lambda_{ср} = 0{,}001\exp(0{,}01n_{ср})10^{-6}$ 1/ч $= 0{,}0074 \cdot 10^{-6}$ 1/ч;
- интенсивность отказов соединителя $\lambda = 10 \cdot 2{,}58 \cdot 0{,}0013 \cdot 10^{-6} + 10 \cdot 0{,}0074 \cdot 10^{-6} = 0{,}107 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

В заключение следует отметить, что электрические соединители являются электромеханическими устройствами и чаще всего самым слабым звеном в ЭА. Причинами ненадежности в работе надежных соединителей является их неправильная установка, некачественный монтаж, плохое обслуживание, пыль и грязь. Важнейшее требование к соединителю — прочность и адекватность конструкции изделия, на которое соединитель устанавливается. При установке соединителя на панель или корпус изделия последние должны обладать достаточной жесткостью, чтобы предотвратить передачу механических воздействий на соединитель и жгут.

Контрольные вопросы

1. Перечислите параметры электрических соединений и проанализируйте их влияние на конструкцию ЭА.
2. От каких параметров зависит длина электрически короткой и длинной ЛП?
3. В чем количественно выражается перекрестная помеха и помеха отражения?
4. Для ЛП без потерь с параметрами $L_п = 0{,}5$ мкГн/м и $C_п = 30$ пФ/м определить:
   - волновое сопротивление;

- напряжение на входе и выходе линии, если мощность в нагрузке составляет 10 Вт (линия передачи согласована по входу и по выходу).

5. Линия передачи с волновым сопротивлением 100 Ом нагружена на входе на 50, а на выходе на 200 Ом. Время задержки сигнала в линии 100 нс. Входное напряжение задано ступенькой напряжения амплитудой 9 В. Показать характер изменения напряжения на входе и выходе линии.
6. В чем особенности конструкций световодов и волоконно-оптических кабелей?

6. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

6.1. Основные понятия

Рассмотрим основную терминологию и понятия, относящиеся к разработке технологии изготовления и организации производства ЭА. В соответствии с Государственными стандартами ЭА, какой бы сложной она не была, относится к *изделиям*, выпускаемым на производстве.

Изделием называется любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии, т. е. изделие — это продукт конечной стадии производства. Изделием может быть *деталь, сборочная единица, комплекс и комплект.* Применительно к ЭА под изделием понимается как сама ЭА, так и все составляющие ее элементы и детали.

Деталь — изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала без применения сборочных операций, например ось, клемма, рама и т. д.

Сборочная единица — изделие, составные части которого подлежат соединению на предприятие-изготовителе сборочными операциями (свинчивание, сварка, пайка, склеивание), например: ячейка, ТЭЗ, разъем, блок и т. д.

Комплекс — два или более изделия, несоединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенные для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций. Каждое изделие в комплексе имеет свое назначение, например: вычислительный комплекс, радиолокационный комплекс и т. д.

Комплект — два или более изделия, несоединенные на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющие набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера, например: комплект измерительной аппаратуры, комплект запасных частей

и т. д. Изделие, имеющее две или более детали, соединенные разъемным или неразъемным соединением, называют *узлом*.

Производственный процесс — совокупность действий рабочих и орудий производства, в результате которых исходные материалы, полуфабрикаты и компоненты превращаются в готовую продукцию (платы, ячейки, блоки и т. п.), соответствующую своему назначению.

Производственный процесс делится на *основной* и *вспомогательный*. К **основному производственному процессу** относят процессы по изготовлению продукции, предусмотренные заказчиком; к **вспомогательному** — процессы складирования, транспортировки, ремонта, энерго- и водоснабжения и др.

Технологический процесс (техпроцесс) — часть производственного процесса, непосредственно связанная с последовательным изменением состояния предмета труда с превращением его в готовую продукцию. Технологический процесс делится на *операции*, а операции — на *установы, позиции, технологические переходы, ходы, приемы*.

Технологическая операция — законченная часть ТП, выполняемая на одном рабочем месте одним или несколькими рабочими над одним или несколькими совместно обрабатываемыми или собираемыми деталями.

Установ или **установка** — часть технологической операции, выполняемая при неизменном закреплении обрабатываемой заготовки (заготовок) или собираемой сборочной единицы.

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

Вспомогательный переход — законченная часть технологической операции, которая не сопровождается изменением формы или состояния заготовки, но необходима для выполнения технологического перехода. Например, установка заготовки, ее закрепление и т. д.

Проход — часть перехода, заключающаяся в снятии одного слоя материала с обрабатываемой поверхности.

Рабочий ход — законченная часть перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, сопровождаемого изменением формы, размеров, шероховатости или свойств заготовки.

Вспомогательный ход — законченная часть перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки без изменения формы, размеров, шероховатости или свойств заготовки.

Холостой ход — то же, что и вспомогательный ход для станков-автоматов.

Позиция — каждое новое положение заготовки относительно инструментов при неизменном ее закреплении в приспособлении. Например, поворотное многопозиционное приспособление.

Прием — совокупность отдельных движений в процессе выполнения работы или подготовки к ней (пуск станка, выключение и т. п.).

Рабочее место — часть производственной площади, оснащенной основным технологическим и вспомогательным оборудованием и средствами, закрепленными за рабочим для выполнения операции.

Такт выпуска — интервал времени, через который производится выпуск изделий. Например, 1 компьютер через 10 мин.

Ритм выпуска (производительность) — обратная величина такта – количество изделий в единицу времени.

Различают три основных типа производства продукции — единичное, серийное и массовое. *Единичное производство* характеризуется единичным или малым объемом выпускаемых изделий, процесс изготовления которых не повторяется или повторяется через неопределенный промежуток времени. Для единичного производства характерно применение универсального, переналаживаемого оборудования, высококвалифицированного персонала, высокая себестоимость продукции и низкая производительность.

Серийное производство характеризуется изготовлением изделий периодически повторяющимися партиями, сериями. В зависимости от количества изделий в партии различают мелкосерийное, среднесерийное (серийное), крупносерийное производство. Выпуск партий еженедельный, ежемесячный, ежеквартальный. Для серийного производства характерно использование специализированного и автоматизированного оборудования и оснастки, особенно станков с ЧПУ. В ряде случаев, особенно для крупносерийного производства, используют специальное и автоматическое оборудование. Для многономенклатурного серийного производства экономически выгодно использование гибких производственных систем (ГПС), для которых используют автоматизированную систему технологической подготовки производства (АСТПП), автоматизированную систему управления технологическими процессами (АСУТП). Производство ЭА различного назначения имеет серийный характер. В серийном производстве рабочие имеют среднюю и высокую квалификацию, производительность труда выше, чем при единичном производстве.

Массовое производство — это производство одинаковых изделий в течение длительного периода времени. Особенностью данного производства является закрепление за одним рабочим местом одной операции, требующей использования рабочих невысокой квалификации или исключения из процесса рабочих и замены их роботами и робототехническими комплексами. Для массового производства характерным является поточный принцип изготовления продукции на автоматических линиях, цехах и даже автоматических заводах. Оборудование и оснастка, как правило, специальное, дорогое и высокопроизводительное. Производство микросхем и ЭРЭ следует отнести к массовому типу производства.

6.2. Виды технологических процессов

Технологические процессы (ТП) в зависимости от подробности их разработки, типизации, наличия оборудования и объема выпуска изделий классифицируют на следующие виды:

- *проектный* (начальная стадия, много вариантов);
- *рабочий* (конкретный, для работы);
- *единичный* (ТП только на данное изделие, как правило, массовое производство);
- *типовой* (на конструктивно подобные изделия. Например, ТП на изготовление печатных плат);
- *групповой* (на технологически подобные изделия для мелкосерийного, многономенклатурного производства);
- *временный* (оперативный), для имеющегося на предприятии оборудования при изготовлении пробных изделий;
- *стандартный* (обязательный к применению для отрасли, государства. Например, стандартные методики испытания электронно-вычислительной аппаратуры);
- *перспективный* (для вновь разрабатываемых производств или модернизации старых предприятий);
- *маршрутный*;
- *операционный*;
- *маршрутно-операционный*.

Последние три определяют степень подробности разработки ТП.

Маршрутный технологический процесс определяет порядок (маршрут) следования операций, их вид и наименование, оборудование и оснастку для выполнения операций, трудоемкость выполнения операций и квалификацию работников. Для мелкосерийного производства достаточна разработка *маршрутной технологии*. При этом все параметры разработки заносятся в маршрутные карты.

Для средне- и крупносерийного, а также массового производств после маршрутной технологии следует разработка *операционной технологии*. При этом каждая операция разрабатывается подробно. Окончательно выбирается оборудование и оснастка, выбираются или рассчитываются технологические режимы. Операция дробится на технологические переходы — используется принцип дифференциации и концентрации технологических переходов при выполнении операции. Вычерчивается эскиз операции с установочными базами и настроечными размерами. Рассчитывается *операционное время* ($t_{оп}$) и окончательно устанавливается *норма штучного времени* ($T_{шт}$). Данные разработки заносятся в операционные карты.

Маршрутно-операционная технология применяется, когда на отдельные наиболее сложные операции маршрутной технологии разрабатывается операционная технология.

Исходными данными для разработки технологических процессов являются:

- конструкторская документация на изделие (сборочные чертежи, рабочие чертежи, электрические схемы, монтажные схемы);
- технические требования на изделие, где указываются дополнительные требования к изделию. Например, необходимость защиты, виды испытаний;
- спецификация на входящие в изделие компоненты;
- объем выпуска продукции (N);
- сроки выпуска (еженедельно, ежемесячно, ежеквартально);
- наличие технологического оборудования, оснастки;
- справочная, нормативная литература, программы.

6.3. Этапы разработки технологических процессов

Правила разработки техпроцессов определены в рекомендациях Р50-54-93-88. В соответствии с этими правилами разработка ТП состоит из последовательности этапов, набор и характер которых зависит от типа запускаемого в производство изделия, вида ТП, типа производства. В табл. 6.1 в качестве примера приведены этапы разработки ТП монтажа и сборки электронных узлов.

Таблица 6.1. **Этапы разработки ТП монтажа и сборки электронных узлов**

Этап	Основные задачи этапа
Анализ исходных данных	Изучение конструкторской документации. Анализ и расчет технологичности конструкции. Анализ объема выпуска изделия и определение типа производства
Выбор типового (базового) ТП	Формирование технологического кода изделия по классификатору. Определение места изделия в классификационной группе. Принятие решения об использовании действующего ТП
Разработка схемы сборки	Анализ состава деталей, комплектующих и сборочных единиц изделия. Выбор базовой детали или сборочной единицы. Анализ способов сборки и монтажа. Разработка схемы сборки с базовой деталью
Составление маршрутного ТП	Определение последовательности технологических операций. Определение штучного времени $T_{шт}$ по заданному коэффициенту закрепления операций $K_{з.о}$ и объему выпуска N изделий. Выбор оборудования и средств технологического оснащения

Окончание табл. 6.1

Этап	Основные задачи этапа
Разработка технологических операций	Разработка структуры операции и последовательности переходов. Разработка схем базирования и установки деталей при сборке и монтаже. Выбор средств технологического оснащения (окончательный). Расчет точности операции (собираемости). Расчет режимов, составляющих $T_{шт}$ и загрузки оборудования
Расчет технико-экономической эффективности	Определение разряда работ по классификатору разрядов и профессий. Выбор вариантов операций по технологической себестоимости
Анализ ТП с точки зрения техники безопасности	Выбор и анализ требований по шуму, вибрациям, радиации, воздействию вредных веществ. Выбор методов и средств обеспечения сохранности и устойчивости экологической среды
Оформление технологической документации	Оформление эскизов технологических операций и карт. Оформление карт маршрутного и операционного техпроцессов
Разработка ТЗ на специальную оснастку	Схема базирования заготовки (заготовок). Определение погрешностей базирования и точности приспособлений. Определение количества заготовок и схемы их закрепления. Составление схем привязки приспособления к оборудованию

Изучение документации позволяет оценить конструктивную компоновку и особенности сборочного узла; количественный состав навесных элементов и деталей пространственной компоновки; характер размещения и варианты установки ЭРЭ и интегральных микросхем (ИМС) на плате; виды контактных соединений и способы электрического монтажа навесных элементов; технические требования обеспечения надежности функционирования узла и защиты его от внешних воздействий.

Анализ и расчет технологичности электронного узла

Комплексное понятие «технологичность» включает в себя большое количество параметров запускаемого в производство изделия, ТП и непосредственно производства, определяющих в конечном итоге потребительские качества изделия. Анализ технологичности позволяет оценить возможность использования для изготовления деталей, сборки и монтажа изделия известных методов выполнения операций и процессов, выполняемых на достаточно высоком уровне механизации и автоматизации.

Количественная оценка технологичности электронных узлов проводится по системе базовых показателей (табл. 6.2), включающих отработанные и достигнутые при доработке и совершенствовании изделия параметры. По базовым показателям рассчитывается комплексный показатель технологичности по выражению

$$K_{\text{тех}} = \sum_{1}^{7} K_i \varphi_i \Big/ \sum_{1}^{7} \varphi_i,$$

где φ_i — коэффициент весовой значимости показателя $\varphi_i = \dfrac{i}{2^{i-1}}$.

Таблица 6.2. **Базовые показатели технологичности электронных узлов**

№ п/п	Показатель	Формула расчета	Значимость φ_i	Примечания
1	Коэффициент использования ИМС и микросборок	$K_{\text{исимс}} = \dfrac{H_{\text{имс}}}{H_{\text{имс}} + H_{\text{эрэ}}}$	1,0	$H_{\text{имс}}$ — количество микросхем; $H_{\text{эрэ}}$ — количество других навесных элементов
2	Коэффициент автоматизации и механизации монтажа	$K_{\text{а.м}} = \dfrac{H_{\text{а.м}}}{H_{\text{м}}}$	1,0	$H_{\text{м}}$ — общее количество контактных соединений; $H_{\text{а.м}}$ — количество соединений, выполняемых механизированным способом
3	Коэффициент механизации подготовки к монтажу	$K_{\text{м.п}} = \dfrac{H_{\text{мп.эрэ}}}{H_{\text{эрэ}}}$	0,8	$H_{\text{мп.эрэ}}$ — количество навесных элементов, подготавливаемых к монтажу механизированным способом; $H_{\text{эрэ}}$ — общее количество навесных элементов
4	Коэффициент механизации контроля и настройки	$K_{\text{м.кн}} = \dfrac{H_{\text{м.к.н}}}{H_{\text{к.н}}}$	0,5	$H_{\text{к.н}}$, $H_{\text{м.к.н}}$ — общее и осуществляемое механизированным способом количество операций контроля
5	Коэффициент повторяемости ЭРЭ	$K_{\text{пов}} = 1 - \dfrac{H_{\text{т.эрэ}}}{H_{\text{эрэ}}}$	0,3	$H_{\text{т.эрэ}}$ —количество типоразмеров ЭРЭ

Окончание табл. 6.2

№ п/п	Показатель	Формула расчета	Значимость φ_i	Примечания
6	Коэффициент применяемости ЭРЭ	$K_{\text{ПЭРЭ}} = 1 - \frac{H_{\text{Т.ОР.ЭРЭ}}}{H_{\text{Т.ЭРЭ}}}$	0,2	$H_{\text{Т.ОР.ЭРЭ}}$ — количество типоразмеров оригинальных ЭРЭ
7	Коэффициент прогрессивности формообразования деталей	$K_{\Phi} = \frac{Д_{\text{ПР}}}{Д}$	0,1	$Д$ — общее число детале; $Д_{\text{ПР}}$ — число деталей, изготавливаемых прогрессивными методами

Часть данных для расчета берется из ТД на изделие ($H_{\text{ИМС}}$, $H_{\text{ЭРЭ}}$, $H_{\text{Т.ЭРЭ}}$, $H_{\text{Т.ОР.ЭРЭ}}$, $Д$). Количество контактных соединений на плате определяется подсчетом выводов навесных элементов, петель объемного проводного монтажа, проводов-перемычек. Так как на плате все контактные соединения получают пайкой, то оценивается возможность механизации пайки $H_{\text{А.М}}$, с учетом конструкции соединения (планарный вывод, штыревой вывод, петля провода и т. д.), известных способов пайки, наличия оборудования и серийности производства.

Возможность механизации подготовки выводов навесных элементов к монтажу $H_{\text{МП.ЭРЭ}}$ определяется наличием стандартных форм выводов, типом и типоразмерами их корпусов. ИМС в корпусах четвертого типа имеют стандартную форму выводов. Для их формовки применяют приспособления с ручным приводом, штампы и механизированные устройства. Более трудоемка планарная формовка штыревых выводов конденсаторов. Формовку выводов небольшого количества диодов и резисторов следует осуществлять вручную.

Коэффициент механизации контроля и настройки $K_{\text{М.К.Н}}$ относительно невелик, так как для сборки электронных узлов необходим ряд трудоемких и маломеханизированных операций контроля: проверка паяемости плат перед монтажом, качества отмывки и лакировки плат, качества приклейки прокладок под корпуса навесных элементов, установки элементов и качества пайки их выводов. Функциональные параметры платы контролируются на специальных стендах. Расчетное значение $K_{\text{тех}}$ сравнивается с нормативным $K_{\text{н}}$, который для серийного производства электронных узлов изменяется в пределах 0,5—0,8, для установочной серии — 0,45—0,75 и для опытного образца — 0,4—0,7.

Выбор техпроцесса сборки электронного узла

Для ТП сборки и монтажа конструктивных элементов первого уровня (модулей, ТЭЗ, узлов) типовые операции приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3. **Основные операции ТП сборки**

Основные этапы сборки	Объекты сборки	Основные типовые операции
Комплектация	Печатные платы, навесные элементы, детали	Распаковка из тары поставщика. Входной контроль параметров. Размещение в технологической таре
Подготовка к монтажу	Печатные платы	Промывка платы. Контроль печатного монтажа. Контроль паяемости платы. Маркировка платы
	Навесные элементы (ЭРЭ, ИМС)	Лакирование обозначений номиналов. Рихтовка и обрезка выводов. Флюсование и лужение выводов. Формовка выводов. Промывка и сушка ЭРЭ, ИМС. Комплектация. Кассетирование
Установка на печатную плату	Детали	Установка и закрепление соединителей (разъемов), контактов (штырей, лепестков), навесных шин, прокладок. Стопорение механических соединений
	Навесные элементы	Установка и фиксация резисторов, диодов, конденсаторов, транзисторов. Установка и фиксация микросхем. Контроль установки элементов
Выполнение контактных соединений	Плата с деталями, ЭРЭ, ИМС	Флюсование и пайка соединений. Промывка и сушка модуля. Контроль контактных соединений
Контроль модуля и защита от внешних воздействий	Модуль	Контроль и регулировка функциональных параметров. Монтажные операции (дополнительные). Контроль параметров, защита модуля (лакирование), испытания и контроль. Сдача на соответствие ТУ

Этап комплектации навесных элементов и деталей, входящих в состав модулей первого уровня, трудоемок и выполняется в основном вручную. Это связано с многообразием тары, в которой поставляются ЭРЭ и ИМС. Микросхемы в индивидуальной таре-спутнике распаковываются на автоматах с ориентацией по ключу и укладкой в технологические кассеты.

Этап подготовки к монтажу включает техпроцесс подготовки печатных плат, ЭРЭ, ИМС и конструкционных деталей. Операции подготовки ЭРЭ и ИМС в мелкосерийном производстве выполняются вручную на рабочем месте монтажника простейшими приспособлениями и с дальнейшим размещением элементов в технологической таре по номиналам. В крупносе-

рийном производстве применяются автоматы рихтовки и обрезки выводов, флюсования и лужения, промывки и сушки подготовленных навесных элементов. В некоторых автоматах все эти операции объединены в одном цикле и выполняются в виде переходов. Автоматизированная подготовка требует специальных кассет для загрузки и выгрузки элементов. Для ЭРЭ с осевыми выводами, которые кассетируют путем вклеивания в ленту, формовка производится на автомате непосредственно перед установкой на плату.

Установку на плату начинают со штырей, лепестков, навесных шин, прокладок после подготовки (рихтовка, обезжиривание) их базовых поверхностей. Установка ЭРЭ и ИМС в зависимости от типа производства осуществляется несколькими способами: вручную, со световой индикацией, по шаблону, автоматически.

При *установке вручную* монтажник по схеме или маркировке на плате определяет место положения элемента, извлекает его из тары, устанавливает и, если необходимо, распаивает выводы. Первые два перехода составляют бóльшую часть штучного времени. Для сокращения времени установки всех навесных элементов монтажное поле платы делится на зоны, в каждой из которых работает один монтажник. В этом случае может быть организована конвейерная установка элементов.

Применение *метода световой индикации* требует оснащения рабочего места монтажника проекционной системой и транспортером подачи тары с элементами. С помощью светового луча индицируется место установки, а транспортер синхронно подает тару с элементами требуемого типономинала. Остальные переходы осуществляются монтажником вручную.

Установка по шаблону характеризуется более высоким уровнем механизации. Точное позиционирование монтажного стола осуществляется вручную с помощью щупа и координатных отверстий на шаблоне, а установка элементов — автоматически укладочной головкой. Элементы подаются из кассет в последовательности установки на плату. Этот способ более производительный, но менее универсальный, так как требует сменных или переналаживаемых инструментов при изменении типоразмеров корпусов элементов.

Для *автоматизированной установки* применяется специализированное оборудование с ЧПУ или *робото-технологические комплексы* с подачей элементов из технологических кассет.

Получение контактных соединений в модулях первого уровня осуществляется преимущественно пайкой, расплавленным или расплавляемым припоем под действием постоянного или импульсного нагрева зоны соединения. При одностороннем монтаже навесных элементов на плате и фиксации их положения (подгибка, зиг-формовка, подпружинивание, предварительная подпайка выводов, приклеивание корпуса элемента) применяется

механизированная пайка волной припоя. Групповая пайка планарных выводов ИМС проводится расплавленным припоем с постоянным нагревом паяльником или расплавляемым припоем с импульсным нагревом электродами, роликами, лучом лазера, струей газа. Импульсный нагрев локализует тепловое воздействие в зоне выводов, но требует дополнительной подачи припоя путем напрессовки, подачи трубчатого припоя в зону пайки, качественного лужения. Операции промывки и сушки модулей необходимы для удаления флюса, продуктов пайки, следов от рук, пыли. Они выполняются на механизированных конвейерных линиях. Качество контактных соединений оценивается визуально.

Этап контроля модулей наиболее ответственный и трудоемкий. Он выполняется в отладочном, диагностическом и контрольном режимах с помощью специальной аппаратуры, стендов и автоматических систем контроля. Замена неисправных ИМС требует дополнительных монтажных операций и повторного контроля параметров. Годные модули проходят операции лакирования и сушки и, если необходимо, испытания с контролем параметров.

Анализ объема выпуска изделия

Годовой объем выпуска электронного узла N, шт./год, позволяет рассчитать такт выпуска $T_в$, мин/шт., определить количество изделий, выпускаемых в смену, в месяц, в квартал, сделать вывод о типе (серийности) производства, выбрать оборудование соответствующей производительности и оценить его загрузку, провести технико-экономическое обоснование операций и ТП.

На этапе анализа исходных данных определяется $T_в = 60Ф_д/N$ мин/шт., сменное задание и месячная партия изделий. Действительный годовой фонд времени $Ф_д$ при односменной работе составляет около 2070 ч. Он определяется количеством рабочих дней в году (253), продолжительностью рабочей недели (41 ч) и смены (8,2 ч), учитывает дни с полной продолжительностью смены (247) и сокращенные на 1 ч (6). Годовой фонд времени работы технологического оборудования $Ф_{об} < Ф_д$, что связано с техническим обслуживанием и принятым на предприятии коэффициентом использования оборудования. Так, для механического, сборочно-монтажного и регулировочного оборудования $Ф_{об} = 2030$ ч, для конвейера — 1970 ч, автоматов и полуавтоматов — 1955 ч.

Разработка схемы сборки

После выбора типовых операций и ТП сборки следует перейти к анализу сборочного состава изделия и разработке схемы сборки, которая, например применительно к ЭВМ, представлена на рис. 6.1.

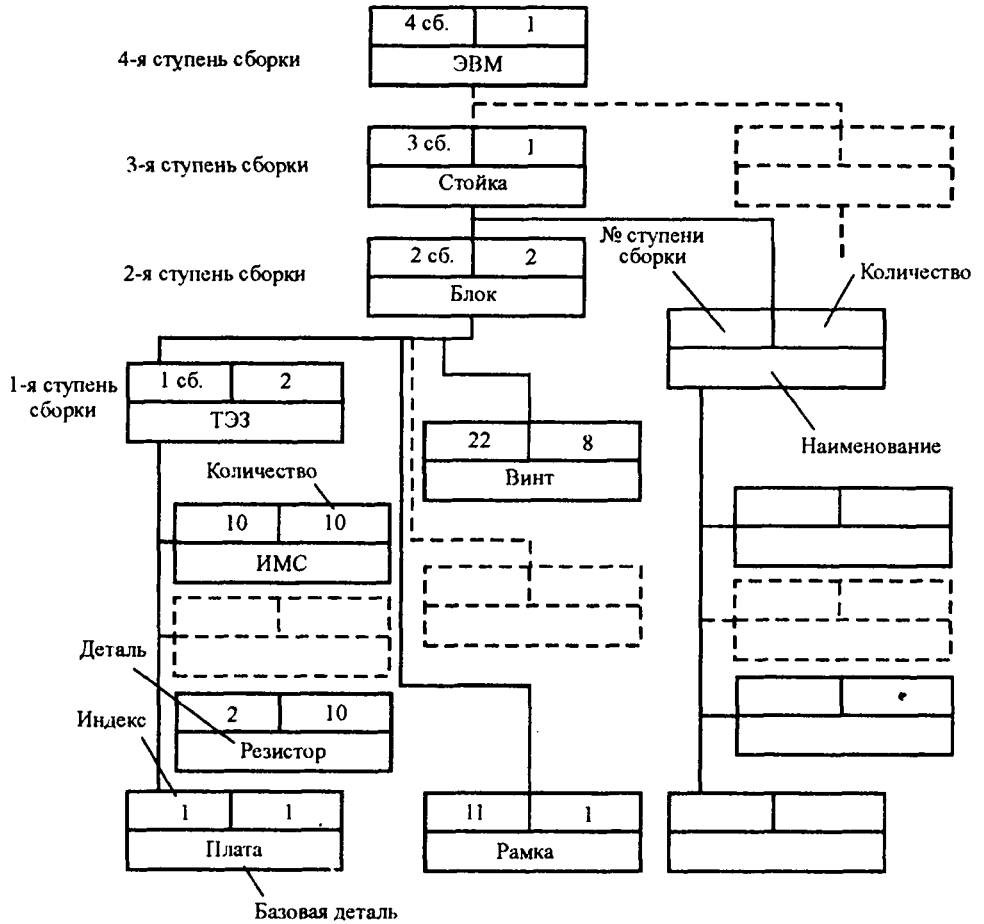


Рис. 6.1. Схема сборочного состава

Ступени сборки ЭВМ, как правило, отражают модульное построение ее конструкции. ТЭЗ — первая ступень, блок — вторая и т. д. Схема сборочного состава отражает состав и количество деталей, количество и уровень сборочных единиц, сами сборочные единицы, сборку которых можно вести параллельно и независимо друг от друга. Однако она не дает информации о последовательности сборки деталей, способах получения соединений и способах монтажа.

Технологическая схема сборки ТЭЗ, приведенная на рис. 6.2, определяет последовательность установки деталей и сборочных единиц на базовую деталь (или сборочную единицу). На схеме должны быть указаны операции получения механических соединений (свинчивание, расклепка, развальцовка, склеивание, сварка); операции электрического монтажа (пайка, сварка,

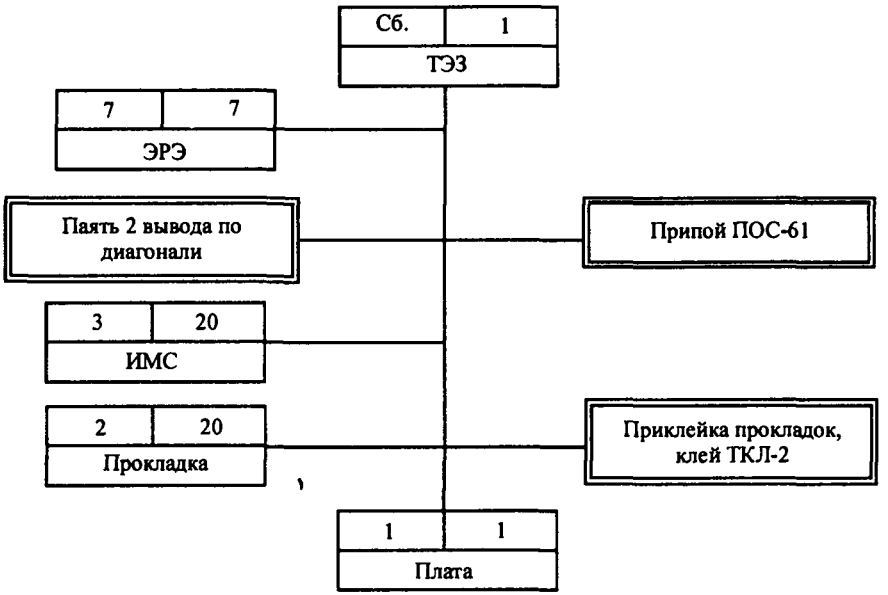


Рис. 6.2. Схема сборки ТЭЗ

накрутка, раскладка проводов); операция контроля и герметизации (промывка, сушка, лакирование, нанесение компаунда).

При разработке схемы сборки необходимо выбрать базовую деталь. Для модулей первого уровня это — ПП. Для модулей второго уровня базовой деталью может быть конструкционная рамка или каркас блока, представляющий сборочную единицу. Детали и сборочные единицы изображаются в виде прямоугольников (см. рис. 6.2), в которых указывается номер по спецификации, наименование и количество. От базовой детали к готовой сборочной единице проводится главная линия сборки, а от устанавливаемых деталей или сборочных единиц — линии до пересечения с ней. Расположение точек пересечения на главной линии говорит о выбранной последовательности сборки. Операции сборки и монтажа указываются текстом в прямоугольных рамках в том месте, где они осуществляются. Для упорядочения схемы сборки по одну сторону от главной линии изображаются устанавливаемые детали и сборочные единицы, по другую — крепежные детали и монтажные операции. Если текст занимает много места, то операции могут быть пронумерованы, а расшифровка их сделана вне схемы сборки.

Разработка маршрутного ТП сборки

Исходными данными для разработки маршрутного ТП являются: схема сборки с базовой деталью, типовой ТП, объем выпуска *N*, шт./год, коэф-

фициент закрепления операций $K_{з.о}$ — отношение количества операций к количеству рабочих мест: $K_{з.о} = 1$ — массовое производство, $K_{з.о} = 2—10$ — крупносерийное, $K_{з.о} = 11—20$ — среднесерийное, $K_{з.о} = 21—40$ — мелкосерийное. Для заданных N и $K_{з.о}$ определяется среднее штучное время операции, $T_{шт.ср} = T_в / K_{з.о}$, где $T_в = 60Ф_д / N$. Расчетное значение $T_{шт.ср}$ обеспечивается дифференциацией или концентрацией операций, подбором оборудования определенной производительности, рекомендуемого в типовом ТП, справочной или технической литературе. Маршрутный ТП корректируется после разработки операционного ТП, нормирования операций и технико-экономического обоснования структуры операций. По приведенному ниже образцу составляется маршрутная карта техпроцесса сборки и монтажа, где $T_{п.з}$ — подготовительно-заключительное время.

№ п/п	Наименование операции	Оборудование, оснастка	$T_{шт.расч}$	Разряд рабочего	$T_{п.з}$

Рассмотрим разработку маршрутного ТП сборки и монтажа модуля первого уровня при объеме выпуска N = 15 000 шт./год и $T_в$ = 6 мин. Если в смену на сборку выделить 6 ч чистого рабочего времени, то объем партии составит 60 шт./смену.

Примем, что на каждой плате устанавливаются 2 лепестка заземления, 2 провода-перемычки, 80 ИМС в четвертом типе корпуса, 80 конденсаторов типа К53 и 160 диэлектрических прокладок под каждый корпус навесного элемента. Составим в табличной форме маршрутный ТП с указанием содержания и последовательности операций, а также предварительно выбранного оборудования (табл. 6.4). Примем, что ПП, ИМС и конденсаторы прошли типовые ТП подготовки к сборке и монтажу.

Проанализируем выбор оборудования в разработанном маршрутном ТП. $T_{шт}$ операций установки лепестков и монтажа перемычек не превышает 0,5 мин. Это позволяет выполнять на одном рабочем месте монтажника вручную слесарно-сборочную и монтажные операции, так как предельное в этом случае значение $K_{з.о} = T_в / T_{шт} = 12$. Эмаль стопорения лепестков сохнет 5—6 ч, что требует одновременного размещения в шкафу не менее 60 плат (сменный выпуск) и работы с суточным заделом.

Так как на плате устанавливаются ИМС и конденсаторы различных типономиналов и типоразмеров корпусов, целесообразно применение монтажного устройства, с помощью которого на плату устанавливаются ИМС и конденсаторы по методу световой индикации. Учитывая его производительность (см. табл. 6.4) и затраты времени на нанесение клея и подпайку выводов, необходимы два устройства.

Таблица 6.4. **Маршрутный ТП сборки модуля первого уровня**

№ п/п	Наименование и содержание операции	Оборудование, производительность
1	Слесарно-сборочная: установка и стопорение лепестков	Монтажный стол
2	Сушка эмали стопорения лепестков	Шкаф сушки
3	Монтажная: установка и пайка проводов — перемычек	Монтажный стол
4	Монтажная: установка и приклейка диэлектрических прокладок	Монтажный стол
5	Сушка и полимеризация клея	Шкаф сушки
6	Монтажная: установка, приклейка и диагональная подпайка выводов ИМС	Устройство программированной сборки со световой индикацией, 500...600 элементов/ч
7	Монтажная: установка и приклейка конденсаторов	
8	Сушка и полимеризация клея	Шкаф сушки
9	Монтажная: пайка выводов ИМС	Полуавтомат ПНП-5, 800...1000 шт./ч
10	Монтажная: пайка выводов конденсаторов	Квант 50-01, 250...300 шт./ч
11	Контрольная: контроль контактных соединений (визуально)	Монтажный стол
12	Промывка модулей	Линия промывки, 150 плат/ч
13	Контрольная: диагностический контроль и разбраковка	Аппаратура контроля логических блоков, цикл — 2 мин
14	Лакирование модулей	Установка лакирования 60...120 плат/ч
15	Сушка модулей	Установка сушки, 50...60 плат/ч

Полуавтомат непрерывной пайки планарных выводов ИМС (ПНП-5) имеет высокую производительность и позволяет переналаживать паяльную головку в зависимости от типоразмеров корпусов. Неизбежны трудности механизированной пайки цилиндрических выводов конденсаторов с планарной формовкой. Эту операцию можно выполнить на лазерной установке пайки. Линии промывки, лакирования и сушки модулей по производительности значительно превышают расчетный такт выпуска. Их применение гарантирует соблюдение режимов и условий обработки при обработке различных типов изделий. При заданном объеме выпуска N, шт./год, известной производительности оборудования n, шт./ч и годовом фонде времени его работы $\Phi_{об}$, ч, можно определить расчетное количество оборудования для каждой операции

$$K_{расч} = N / n \cdot \Phi_{об}.$$

Если известна трудоемкость на одно изделие, то

$$K_{\text{расч}} = T \cdot N / \Phi_{\text{об}}.$$

Разработка технологических операций

Цель этапа разработки *операционного ТП* — полная детализация выполнения операций. Этот этап включает:

- определение структуры операции, последовательности переходов и работы инструментов;
- выполнение операции с изображением состояния объекта, схемы базирования или установки деталей, инструментов, направлений главных перемещений, геометрических размеров, достигнутых на данной операции. Эскиз сопровождается таблицей, содержащей переходы, условия и режимы их выполнения, основное $t_{\text{о}}$ и вспомогательное $t_{\text{в}}$ время, действительную и допустимую погрешности базирования;
- расчет режимов и условия сборки и монтажа, времени $T_{\text{шт}}$ с учетом технологических возможностей предварительно выбранного оборудования. Уточнение времени фактической загрузки оборудования;
- расчет точности операции, условий собираемости сопрягаемых деталей, действительных погрешностей. Определение точностных требований к сборочно-монтажным приспособлениям;
- нормирование операций, выбор разряда рабочего, расчет технологической себестоимости операции, технико-экономическое обоснование вариантов операции;
- обоснование выбора технологической оснастки или разработка технического задания на ее проектирование.

Рассмотрим более подробно этапы разработки монтажной операции пайки ИМС с планарными выводами (рис. 6.3). Для упрощения эскиза на плате изображены 9 ИМС с рядовой установкой. В соответствии с маршрутным ТП (табл. 6.4) пайка осуществляется на полуавтомате непрерывной пайки ПНП-5.

Структура операции параллельно-последовательная. Пайка выполняется параллельно двумя наконечниками (жалами) одновременно двух противолежащих выводов и последовательно остальных выводов микросхемы, а также ИМС, установленных в одном ряду. Необходимы три прохода (3 ряда ИМС) с возвратом паяльной головки каждый раз в исходное положение (условие непрерывной пайки) и перемещением к координате следующего ряда.

Два наконечника паяльной головки показаны в рабочем положении. Они прижаты к выводам усилием P и перемещаются с технологической скоростью V вдоль ряда ИМС, т. е. поперек планарных выводов. Указаны раз-

Наименование перехода	S, мм	V, м/мин	Припой и флюс	t, °С	Δ	ε	t_0	$t_в$

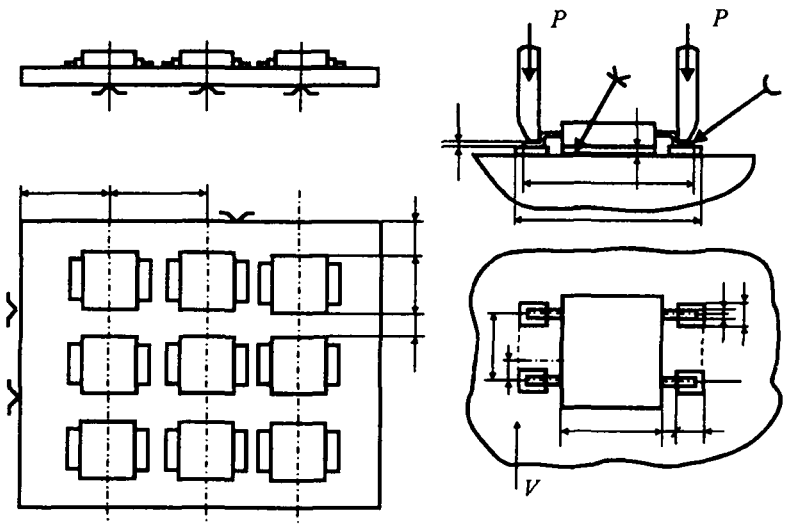


Рис. 6.3. Таблица параметров монтажной операции и эскиз монтажа

меры корпусов, выводов ИМС и контактных площадок для настройки паяльной головки, а также шаг размещения ИМС на плате и расстояния между рядами для расчета режимов и времени пайки.

В таблице на рис. 6.3 указывается количество проходов, рабочий путь перемещения головки S, мм и скорость V, припой и температура пайки, допустимая Δ и действительная геометрическая погрешность ε расположения контактных соединений.

При расчете рабочего пути паяльной головки необходимо знать шаг установки и длину корпуса ИМС. Если шаг велик или в ряду отсутствует ИМС, то целесообразно на нерабочих участках перемещать головку ускоренно для увеличения производительности. Технологическая скорость V выбирается из условия ограничения времени контакта жала с выводом (не более 2—3 с), обеспечения качества пайки (скелетная форма соединения, растекание припоя вдоль вывода, отсутствие перемычек). Скорость V должна быть в диапазоне рабочих скоростей головки, обеспечиваемых полуавтоматом. Зная пути рабочих и холостых ходов головки, легко определить основное $t_о$ и вспомогательное $t_в$ время пайки. Время установки (снятия) платы определяется экспериментально или задается по нормативам на соответст-

вующие виды монтажных работ. Таким образом, можно рассчитать время операции пайки ИМС $t_{оп} = t_0 + t_в$. Температура пайки зависит от используемого припоя и допустимого нагрева корпуса ИМС.

Исходными данными для точностного расчета рассматриваемой операции являются размеры планарных выводов ИМС и контактных площадок платы; максимальная величина смещения выводов после установки и приклейки корпуса ИМС; точность настройки наконечников головки; точность позиционирования и рабочего перемещения головки. Размеры выводов и площадок определяются из конструкторской документации, точность установки ИМС — из анализа предыдущей монтажной операции, остальные данные — из документации на оборудование. Зная перечисленные погрешности, можно рассчитать допустимую суммарную погрешность на данной операции.

При нормировании операции пайки ИМС следует взять за основу основное t_o и вспомогательное время $t_в$, определить время технического обслуживания $t_{обсл}$ полуавтомата, подготовительно-заключительное время $T_{п.з}$ на его наладку и принять решение о назначении разряда рабочего. Эти данные можно найти в нормативной литературе.

Для технико-экономического обоснования рассматриваемой операции можно путем расчета технологической себестоимости пайки ИМС $C_Т = A + B/N$ (A — текущие расходы; B — единовременные расходы) сравнить два ее варианта реализации. Например, возможен другой вариант — пайка на установке ППМ-5: параллельная пайка двумя гребенчатыми наконечниками всех выводов одной ИМС; перемещение паяльной головки к следующей ИМС вручную по шаблону.

В качестве технологической оснастки для операции пайки ИМС в рассмотренном примере необходимо приспособление для установки и закрепления платы на столе полуавтомата. Исходными данными для его проектирования являются *схема базирования* (см. рис. 6.3); допустимая погрешность, определенная при точностном расчете операции; время на операцию $t_{оп}$. Кроме перечисленных данных в ТЗ приводится схема установки платы в приспособлении. Она позволяет выбрать конструкцию установочных элементов (опор) приспособления, их расположение и точки приложения усилий закрепления платы. Вспомогательное время $t_в$ регламентирует быстросменность плат в приспособлении и тип привода закрепления (ручной, пневматический, электромагнитный, механический).

6.4. Технологические процессы и качество ЭА

Разработка ТП изготовления, сборки и наладки ЭА должна базироваться на двух основах: технической и экономической. Техническая основа — разра-

батываемый ТП должен обеспечивать необходимое *качество* получаемой ЭА. Экономическая основа — разрабатываемый ТП должен обеспечить выпуск ЭА с минимальными затратами и с высокой производительностью труда.

Под **качеством** при этом понимается совокупность свойств ЭА, удовлетворяющих требованиям заказчика, государственным или мировым стандартам. Понятие качества можно свести к следующим показателям: назначение и область применения, надежность и долговечность, технологичность, точность, эргономичность (дизайн, удобство обслуживания), патентно-правовые показатели, стандартизация и унификация, экономические показатели, экологические показатели. Различают *базовые, частные и комплексные* показатели качества.

На качество изделия большое влияние оказывает *точность* входящих в него деталей, компонентов, узлов и т. п.

Точность параметров ЭА

Точность — степень соответствия действительного (полученного) параметра заданному (X) номинальному.

Эта степень соответствия устанавливается допуском (δ) на параметр изделия и обозначается:

$X^{+\delta}$ — параметр с плюсовым допуском;

$X_{-\delta}$ — параметр с минусовым допуском;

$X \pm \delta/2$ — параметр с равносторонним допуском.

Все параметры качества делятся на следующие группы.

Геометрические — линейные размеры, микронеровности (шероховатость), макронеровности (непараллельность, овальность, неперпендикулярность и т. д.).

Физические — индуктивность, сопротивление, емкость, магнитная проницаемость, проводимость и т. п.

Химические — растворимость, концентрация, скорость травления, скорость диффузии и т. п.

Для определения точности линейных размеров элементов деталей используется единая система допусков и посадок (ЕСДП), опирающаяся на международную систему стандартов ИСО. В ЕСДП приняты 19 *квалитетов точности* (вместо ранее применявшихся классов точности), записываемые в порядке понижения точности: 01, 0, 1, 2, 3, ..., 17. Квалитеты 01, 0 и 1 предназначены для концевых мер длины; квалитеты со 2-го по 4-й — для калибров и особо точных изделий. В квалитетах с 5-го по 13-й даются допуски для сопрягаемых размеров деталей, а в квалитетах с 14-го по 17-й — для несопрягаемых размеров деталей. Допуски обозначают *IT* с порядковым но-

мером квалитета, например *IT12*. Для физических параметров допуск может быть проставлен в процентах. Например, электрическое сопротивление $R_н \pm 5\ \%$, $R_н \pm 10\ \%$, $R_н \pm 20\ \%$.

При любом производстве отдельный параметр имеет разброс из-за производственных погрешностей ($\Sigma\Delta$). Различают три вида производственных погрешностей: постоянные (систематические), закономерно изменяющиеся, случайные.

Погрешность обработки партии деталей называют *постоянной* (*систематической*), если погрешности деталей, входящих в партию, одинаковые. Такая погрешность получается под действием факторов неизменных (постоянных) в течение обработки всей партии деталей. Пример постоянной погрешности — неточность оборудования.

Погрешность обработки партии деталей называют *закономерно изменяющейся*, если при переходе от одной детали к другой изменяется значение погрешности по тому или иному закону. Например, износ инструмента закономерно приводит к росту внешних размеров и уменьшению внутренних (диаметров).

Погрешность обработки партии деталей называют *случайной*, если закономерность изменения отсутствует, и предугадать время появления и направление действия погрешности невозможно. Пример случайной погрешности — температурные колебания, погрешности базирования и т. д.

На практике ни одна из этих погрешностей в чистом виде не проявляется, общая погрешность представляет комбинацию указанных видов погрешностей.

Условия получения заданной точности:

необходимое

$$\delta \geqslant \Sigma\Delta,$$

где δ — допуск на размер (параметр), $\Sigma\Delta$ — производственные погрешности, присущие данному ТП;

достаточное

$$X_{min} \leqslant X \leqslant X_{max},$$

где $X_{max} - X_{min} = \delta$, X — номинальное значение получаемого параметра, X_{max} — максимальное значение получаемого параметра, X_{min} — минимальное значение получаемого параметра.

Если значение погрешностей больше заданного конструктором допуска, то часть параметров выйдет за поле допуска и будет забракована. Чтобы этого не произошло, необходимо изменить точность ТП, подобрать более точное оборудование, стабилизировать режимы, изменить метод обработки, монтажа и т. п.

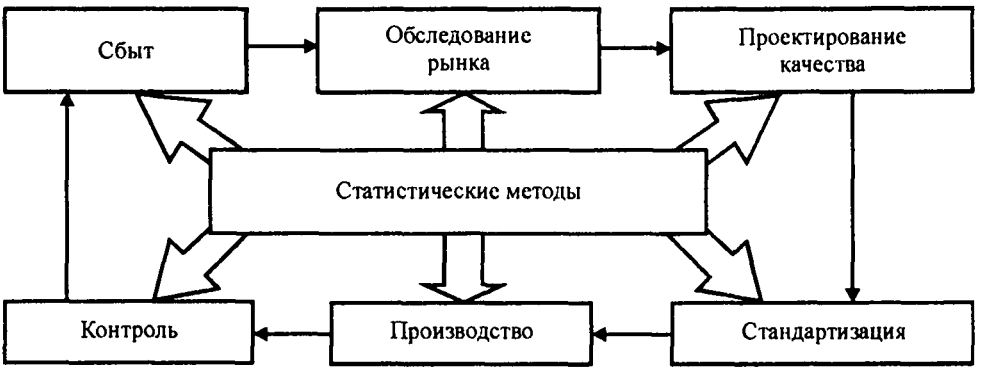


Рис. 6.4. Цикл Деминга

Большое внимание следует уделять *управлению качеством* получаемых изделий. Управление качеством, базирующееся на статистических методах контроля, зародилось в 30-е годы и, развиваясь циклически по так называемому циклу Деминга, проходит через определенные этапы (рис. 6.4).

Понятие цикла Деминга не ограничивается только контролем качества продукции, его можно распространить на все управление производством: план, реализация, проверка, исправление. После завершения первого цикла вновь переходят к составлению нового плана, в который вносятся изменения с учетом предыдущих погрешностей. Цикл является основным методом повышения качества.

Методы оценки точности

Из большого разнообразия методов оценки точности рассмотрим чаще всего применяющиеся в производстве ЭА: наблюдение в цехах, статистический, расчетно-аналитический.

Метод *наблюдения в цехах* основан на сборе данных о точности изделий, получаемых при обработке и сборке, с использованием определенного оборудования и приспособлений, с учетом обрабатываемых материалов, инструментов и т. п. Эти данные систематизируют и сводят в таблицы экономической точности для различных методов обработки. Такие таблицы можно использовать для предварительной оценки точности разрабатываемого ТП.

Статистический метод оценки точности основан на положениях теории вероятности и математической статистики. Так как процесс производства ЭА характеризуется большим количеством факторов, влияющих на качество и требующих системного подхода к его анализу и синтезу, для исследования точности ТП используют различные статистические методы:



Рис. 6.5. Гистограмма и полигон распределения параметров

кривых распределения, точечных и точностных диаграмм и др. Наиболее универсальным является метод *кривых распределения*, позволяющий оценить разброс погрешностей для данного ТП и определить процент возможного брака.

Для построения кривой распределения погрешностей следует замерить партию деталей (конкретный параметр, допустим, размер L) в количестве $N = 100$ шт. Замеренный параметр разбивается на равные интервалы и подсчитывается число n параметров в каждом интервале. Определяется частота m повторений отклонений параметров в партии $m = \frac{n}{N}$. Затем строится гистограмма и полигон распределения параметров (рис. 6.5). Устанавливается характер кривой распределения, исходя из критериев подобия Колмогорова. Вид кривой распределения зависит от характера погрешностей. Случайная погрешность подчиняется закону нормального распределения (закон Гаусса). Так, при работе на настроенных станках распределение случайных погрешностей имеет нормальный вид.

Кривые распределения случайных погрешностей характеризуются *средним размером и средним квадратичным отклонением.* Средний размер $L_{ср}$ определяют по формуле

$$L_{ср} = \frac{L_1 + L_2 + \ldots + L_N}{N} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} L_i,$$

где $L_1, L_2, \ldots, L_N$ — размеры отдельных деталей; N — общее количество деталей в партии.

Среднее квадратичное отклонение σ определяется выражением

$$\sigma = \sqrt{\frac{(L_1 - L_{ср})^2 + (L_2 - L_{ср})^2 + \ldots + (L_N - L_{ср})^2}{N}} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \ldots + x_N^2}{N}} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i^2},$$

где $x_i = L_i - L_{ср}$.

При вычислении значения $L_{ср}$ и σ в случаях большого числа размеров и партии удобнее группировать детали по интервалам размеров и проводить расчет по выражениям

$$L_{ср} = \frac{L_1 n_1 + L_2 n_2 + ... + L_k n_k}{N}; \quad \sigma = \sqrt{\frac{x_1^2 n_1 + x_2^2 n_2 + ... + x_k^2 n_k}{N}} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{k} x_i^2 n_i},$$

где k — число интервалов; $L_1, L_2, \ldots, L_к$ — размеры, соответствующие каждому интервалу; $n_1, n_2, \ldots n_к$ — количество деталей в каждом интервале; $n_1 + n_2 + ... + n_k = N$.

Для определения вероятностных характеристик важную роль играет количество деталей, которые нужно измерить, чтобы получить значения характеристик с достаточной степенью точности и достоверности. Для практических целей обычно бывает достаточно измерения 50...100 деталей. В тех случаях, когда столько деталей получить невозможно, вероятностные характеристики определяются по меньшему N, точность и достоверность результатов необходимо оценивать на основании методов математической статистики.

Ошибку ε при определении среднеквадратического значения вычисляют по формуле

$$\varepsilon = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{2(N-1)}},$$

а при определении среднеарифметического значения

$$\varepsilon = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

где ε — ошибка в долях σ.

Из этих же выражений можно определить N, удовлетворяющее заданной точности.

Уравнение распределения Гаусса (рис. 6.6) в координатах с началом в центре группирования имеет вид

$$y = \varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}},$$

где σ — среднеквадратическое отклонение аргумента; e — основание натуральных логарифмов.

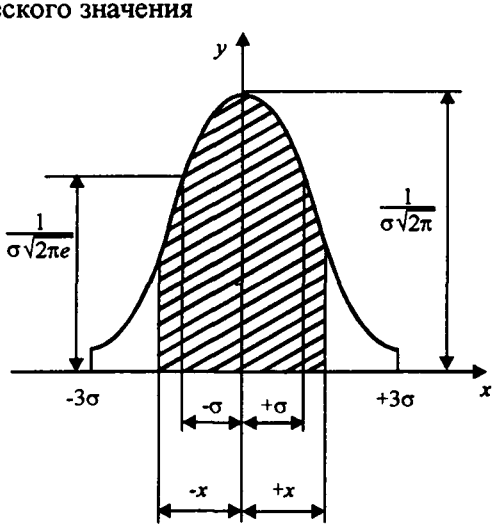


Рис. 6.6. Кривая распределения Гаусса в координатах с началом в центре группирования

В зависимости от значения σ форма кривой нормального распределения меняется. Чем меньше σ, тем у́же кривая и поле рассеивания меньше; чем больше σ, тем кривая более пологая и поле рассеивания растет.

Кривая нормального распределения, асимптотически приближаясь к оси абсцисс, стремится к бесконечности в обе стороны, но, так как вне пределов промежутка ±3σ она почти сливается с осью абсцисс, то с достаточной для практики точностью теоретическую кривую заменяют кривой с полем рассеивания $V = \pm 3\sigma = 6\sigma = L_{max} - L_{min}$.

Площадь, ограниченная кривой нормального распределения и осью абсцисс, равна

$$\int_{-\infty}^{+\infty} y dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = 1.$$

Пользуясь кривой распределения погрешностей, можно найти вероятное количество годных деталей, на размер которых установлен определенный допуск δ.

Вся площадь, ограниченная кривой распределения погрешностей, определяет полное количество деталей, обработанных при постоянной настройке оборудования.

Площадь кривой, соответствующая заданному интервалу отклонений x, определяется интегралом

$$F = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx.$$

Этот интеграл обычно представляют в виде функции Φ(z), причем

$$z = \frac{x}{\sigma}.$$

Дифференцируя это выражение, получим $dx = \sigma dz$. Подставляя значения z и dx, получаем

$$\Phi(z) = 2F(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz.$$

Величина Φ(z), называемая *интегралом вероятностей Лапласа*, для различных z приводится в справочной литературе.

Так как вся площадь, ограниченная кривой, равна единице, то значение Φ(z) определяет вероятность получения размера в пределах ±x. При

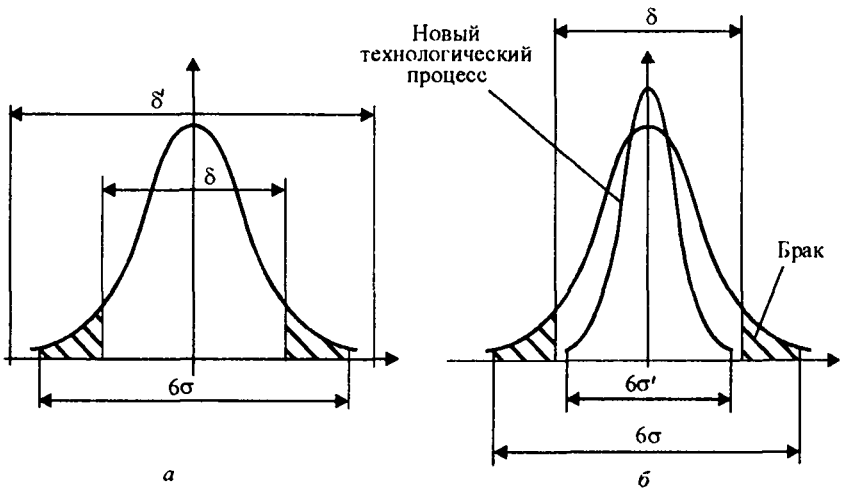


Рис. 6.7. Обеспечение работы без брака:
а — увеличением поля допуска; *б* — улучшением качества техпроцесса

симметричном расположении поля допуска относительно поля рассеивания процент брака P можно определить по формуле

$$P = [1 - \Phi(z)] \cdot 100\ \%.$$

Чтобы не было брака, следует либо увеличить допуск δ, чтобы $\delta' > 6\sigma$ (рис. 6.7, *а*), либо изменить ТП и уменьшить разброс погрешностей $6\sigma'$ (рис. 6.7, *б*).

Если имеет место систематическая постоянная погрешность, скажем, настройки оборудования Δн, то форма кривой распределения не меняется, а происходит ее смещение на величину данной погрешности (рис. 6.8, *а*). Если смешать две партии деталей, изготовленных при различных настройках оборудования, кривая распределения будет иметь вид, представленный на рис. 6.8, *б*.

Распределение систематических закономерно изменяющихся погрешностей происходит по различным законам в зависимости от изменения погрешностей. Если наряду со случайными имеются систематические закономерно изменяющиеся погрешности, то кривая распределения имеет вид, представленный на рис. 6.8, *в*.

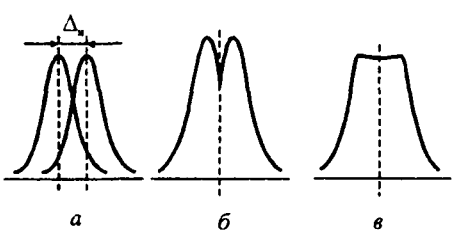


Рис. 6.8. Виды кривых распределения:
а — смещение кривой после поднастройки оборудования; *б* — случай смешения двух партий деталей; *в* — вариант случайно и закономерно изменяющейся погрешности

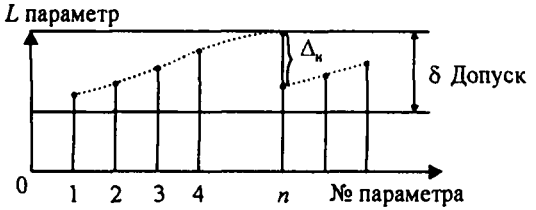


Рис. 6.9. Пример построения точечной диаграммы

Метод кривых распределения дает объективную картину распределения погрешностей для конкретного ТП. Зная величины средних и среднеквадратичных значений отклонений для различных ТП, можно заранее говорить о качестве получаемых изделий и проценте ожидаемого брака. Данный метод не учитывает последовательность обработки деталей, и отделить случайные погрешности от систематических не удается. Если это требуется и необходима большая наглядность в динамике погрешностей, используются *точечные диаграммы* (рис. 6.9). Замеряют параметры изделий в порядке их изготовления и наносят на диаграмму.

На точечной диаграмме видна динамика изменения параметра и период, когда параметр выйдет за поле допуска, т. е. когда следует провести поднастройку.

Однако такое построение трудоемко и неудобно. На практике замеряется группа параметров от 5—10 штук в последовательности их изготовления, определяется их среднее значение и наносится на диаграмму (рис. 6.10).

Получаем диаграмму статистического контроля, которая дает возможность работать без брака, так как время появления параметров, выходящих за контрольную зону A, видно по диаграмме. Контрольная зона A меньше поля допуска из-за малой величины выборки для определения среднего значения параметра на величину $\frac{6\sigma}{\sqrt{m}}$ поля рассеивания среднегрупповых значений параметров, где m — величина выборки (m = 5—10).

Точностные диаграммы (рис. 6.11) — это дальнейшее развитие точечных диаграмм, которые дают более точную картину изменения погрешно-

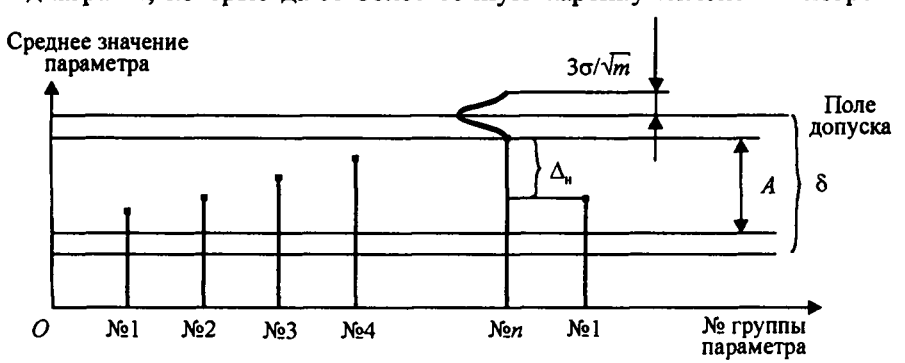


Рис. 6.10. Пример построения диаграммы статистического контроля параметра

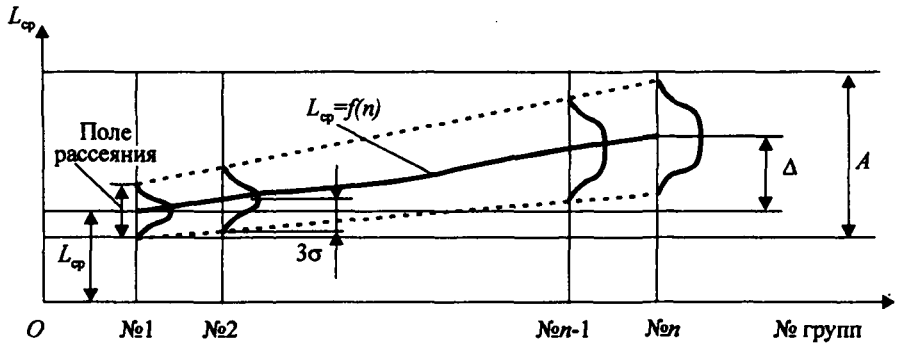


Рис. 6.11. Пример построения точностной диаграммы

стей во времени и выявить закономерность изменения переменных систематических погрешностей.

Порядок построения точностных диаграмм такой же, как и для точечных диаграмм, но выборки последовательно замеряемых параметров увеличиваются до 25 в группе. Для данной выборки строится кривая распределения, и определяются основные статистические параметры: среднее и среднеквадратичное отклонение, поле рассеивания и т. д.

Точностная диаграмма дает возможность установить закон распределения параметров во всей партии изделия для конкретного технологического процесса. Например, $L_{ср} = f(n)$ — закон изменения среднеарифметических значений параметра.

Статистические методы позволяют вскрыть источники погрешностей, возникающих в процессе производства, определить закон изменения систематических, величины этих погрешностей и время поднастройки работы оборудования.

Методы получения заданной точности

Среди методов получения заданной точности при изготовлении деталей и узлов отметим два: метод пробных проходов и промеров и метод автоматического получения параметров (размеров).

Метод пробных проходов и промеров используется в единичном и мелкосерийном производствах для универсального оборудования. Суть метода рассмотрим на примере получения катушки определенного сопротивления. По расчету необходимо намотать на каркас количество витков W, чтобы получить сопротивление R ±5 %.

На намоточном станке после намотки W витков замеряют сопротивление, и, допустим, получили сопротивление больше указанного, тогда отма-

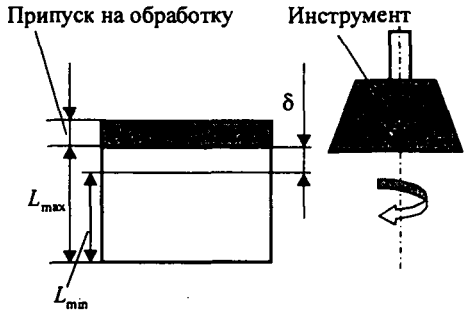


Рис. 6.12. Пример получения размера L автоматическим методом

тывают число n витков и снова замеряют сопротивление, и так продолжается до тех пор, пока не получат необходимое по заданию сопротивление, т. е. постепенно методом проб и промеров достигается желаемый результат. Метод довольно точный, но мало производительный. Для серийного и массового производств этот метод применять не рекомендуется.

Метод автоматического получения параметра основан на том, что оборудование предварительно настраивается на настроечный параметр ($L_н$).

На рис. 6.12 приведен пример получения размера L_{δ} автоматическим методом при шлифовании подложки. Необходимо определить величину настроечного параметра $L_н$.

Если принять за настроечный размер L_{min} (рис. 6.13), то при обработке партии деталей часть деталей, равная по количеству 3σ, уйдет в брак (заштрихованная часть). Следовательно, минимальный настроечный размер необходимо увеличить на 3σ:

$$L'_{нmin} = L_{min} + 3\sigma.$$

Аналогично для определения максимальной границы настроечного размера будем иметь (рис. 6.13) $L'_{нmax} = L_{max} - 3\sigma$. В этом случае допуск на

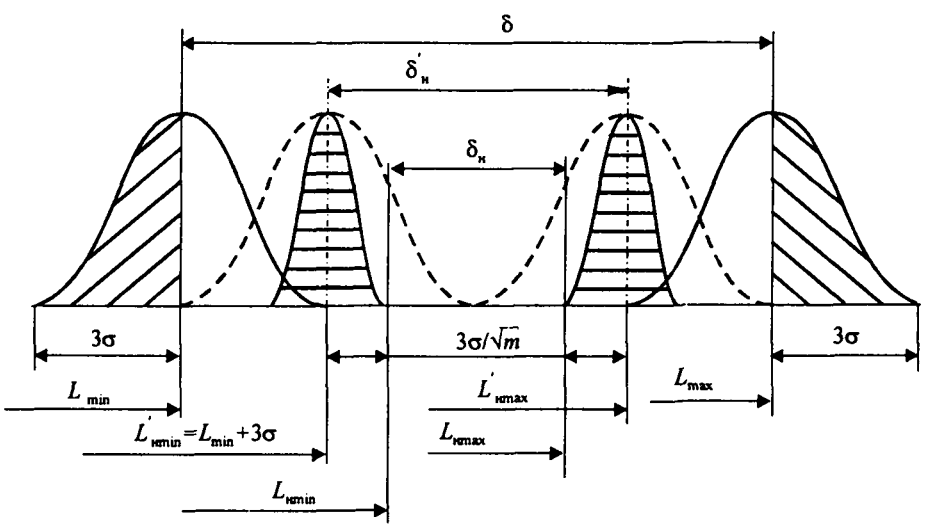


Рис. 6.13. К расчету настроечного размера

дится автоматически без участия рабочего, т. е. существует АСУ, обеспечивающая ведение ТП без брака. Такие системы удерживают ТП в определенном допуске, обеспечивая управляемый ТП.

6.5. Качество поверхности деталей

Качество поверхности полупроводниковых пластин, дискет и т. п. оценивается с геометрической и физической точек зрения. С геометрической точки зрения качество определяется неровностями, выступами и впадинами реальной поверхности; с физической точки зрения — отклонением свойств верхних слоев материала от свойств материала сердцевины.

Если рассмотреть реальную деталь в разрезе (рис. 6.14), то можно выделить *рельефный* слой, который определяет геометрические отклонения от идеального поверхностного слоя; *трещиноватый* слой, в котором нарушена целостность поверхности; *пластически деформированный* слой; *напряженный*, *упругодеформированный* слой. На рис. 6.14 H — высота дефектного слоя, величина его определяется способом обработки. Чем грубее обработка, тем дефектный слой больше. К причинам появления дефектного слоя следует отнести упругие, пластические деформации и деформации разрушения, которые имеют место в процессе обработки; нагрев поверхностного

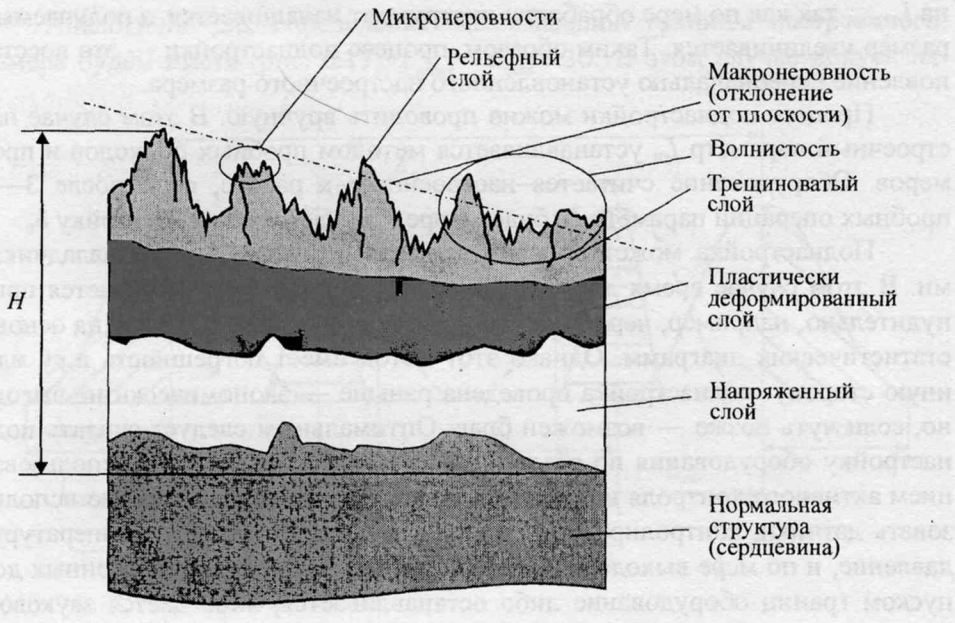


Рис. 6.14. Схема сечения детали после обработки

дится автоматически без участия рабочего, т. е. существует АСУ, обеспечивающая ведение ТП без брака. Такие системы удерживают ТП в определенном допуске, обеспечивая управляемый ТП.

6.5. Качество поверхности деталей

Качество поверхности полупроводниковых пластин, дискет и т. п. оценивается с геометрической и физической точек зрения. С геометрической точки зрения качество определяется неровностями, выступами и впадинами реальной поверхности; с физической точки зрения — отклонением свойств верхних слоев материала от свойств материала сердцевины.

Если рассмотреть реальную деталь в разрезе (рис. 6.14), то можно выделить *рельефный* слой, который определяет геометрические отклонения от идеального поверхностного слоя; *трещиноватый* слой, в котором нарушена целостность поверхности; *пластически деформированный* слой; *напряженный*, *упругодеформированный* слой. На рис. 6.14 H — высота дефектного слоя, величина его определяется способом обработки. Чем грубее обработка, тем дефектный слой больше. К причинам появления дефектного слоя следует отнести упругие, пластические деформации и деформации разрушения, которые имеют место в процессе обработки; нагрев поверхностного

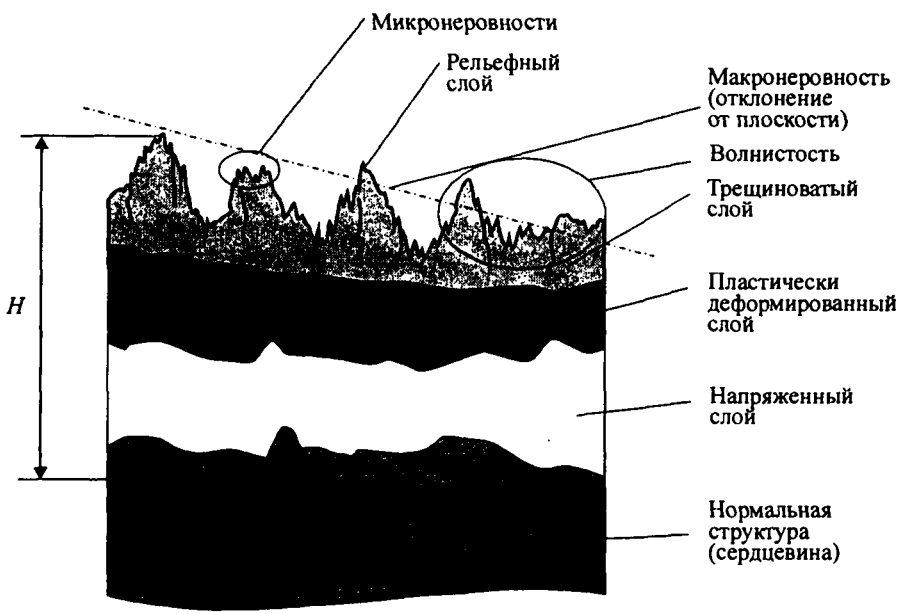


Рис. 6.14. Схема сечения детали после обработки

слоя; химические явления, которые имеют место в зоне обработки: окисление, образование других химических соединений.

На поверхности после обработки образуется более прочный наклепанный слой. Этот слой отличается от материала сердцевины, и чтобы уменьшить различие, часто используют термообработку (отжиг).

Рассмотрим рельефный слой, который состоит из *макронеровностей*, *волнистости*, *микронеровностей* (*шероховатостей*) (см. рис. 6.14). Макронеровности — единичные, неповторяющиеся отклонения поверхности (конусность, непараллельность, овальность). Волнистость — периодически повторяющиеся выступы и впадины на поверхности заготовки или детали. Микронеровности — выступы и впадины на небольших участках поверхности.

Оценка шероховатости (качества поверхности) проводится на основе микронеровностей, которые в ГОСТе определяются четырнадцатью классами шероховатостей: 1-й класс — грубый; 14-й класс — наиболее точный (поверхности обработанных полупроводниковых пластин).

Оценка шероховатости ведется по высоте микронеровностей *Rz* или по среднеарифметическому размеру микронеровностей *Ra*.

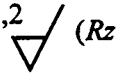
Обозначения шероховатости на чертежах:

 — знак обозначения шероховатости в общем виде;

 — знак обозначения шероховатости при обработке со снятием стружки;

 — знак обозначения шероховатости без снятия стружки в состоянии поставки.

Значение *Ra* указывается без символа, например,  (*Ra* = 1,25 мкм),

Rz — с символом, например,  (*Rz* = 3,2 мкм).

Припуск Δ на обработку — это слой материала, подлежащий удалению в процессе обработки (рис. 6.15). Минимальное значение припуска должно обеспечивать удаление микронеровностей и дефектного слоя, получаемого при предшествующей обработке. Припуск бывает промежуточным и общим.

После удаления общего припуска получают необходимый размер детали $L_{д-\delta}$. Если припуск Δ удаляется не сразу, а постепенно — сначала предварительная (черновая) обработка, а затем окончательная (чистовая) обработка, то общий припуск разбивается на несколько промежуточных. При этом предварительный припуск должен быть как можно бóльшим, что-

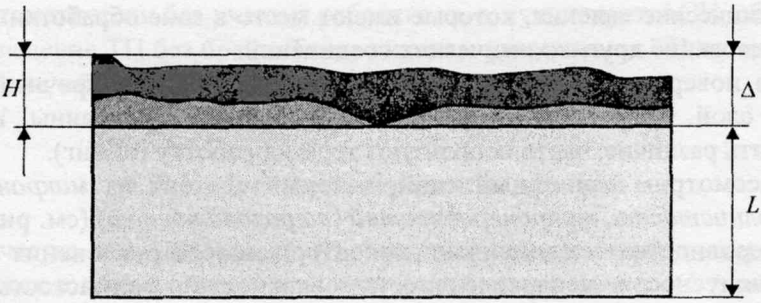


Рис. 6.15. Припуск на обработку детали Δ

бы удалить дефектный слой H, но после предварительной обработки появляется новый дефектный слой, только меньшего размера. Если этот дефектный слой нас устраивает, на этом обработка заканчивается, если нет, — следует применять более точные методы обработки и технологические режимы, обеспечивающие необходимое качество поверхности и получаемого размера. Общий припуск Δ равен сумме промежуточных припусков.

Определение качества поверхностного слоя основывается на измерении микротвердости и толщины наклепанного слоя. Микротвердость определяют по Бринеллю путем вдавливания шарика в поверхностный слой или по Викерсу путем вдавливания алмазной пирамиды. Глубина наклепанного слоя определяется по шлифу, косому срезу поверхностного слоя.

6.6. Производительность труда и норма штучного времени

Производительность труда Q, шт./ч — количество продукции, выпущенной в единицу времени T (за 1 ч, за одну смену и т. п.):

$$Q = \frac{1}{T}.$$

Если, например, одна ПЭВМ выпускается за 30 мин, то за 1 ч будет выпущено $Q = \frac{1}{0,5}$ шт./ч.

Единицу времени T в ТП относят к одной операции. Это время трудоемкости выполнения операции и называется нормой штучного времени $T_{шт}$. Технически обоснованная норма штучного времени определяется по формуле

$$T_{шт} = t_{о} + t_{в} + t_{орг} + t_{тех} + t_{пер},$$

где t_o — время основное, время, затрачиваемое непосредственно на формообразование детали (деформирование, удаление стружки, нанесение материала, сборку, монтаж); $t_в$ — время вспомогательное, время, затрачиваемое на установку, закрепление и раскрепление заготовки и деталей при обработке и сборке, время на подвод и отвод инструмента (инструментов) и т. п.; $t_{орг}$ — время организационного обслуживания рабочего места; затрачиваемое на снабжение рабочего места заготовками, комплектующими, инструментом; на удаление готовой продукции и т. п.; $t_{тех}$ — время технического обслуживания рабочего места; затрачиваемое на подготовку рабочего места к работе: включение аппаратуры, прогрев, установление «0» на приборах; выключение оборудования и его уборку и т. п.; $t_{пер}$ — время перерывов в работе, применительно к поточно-конвейерному производству.

Время, затрачиваемое на выполнение операции, называется *операционным временем*

$$t_{оп} = t_o + t_в.$$

Время на обслуживание рабочего места

$$t_{обс} = t_{орг} + t_{тех}.$$

Ориентировочно можно считать $t_{обс} = 0,2t_{оп}$.

Более точные значения составляющих $T_{шт}$ приводятся в справочной литературе по нормированию работ в приборостроении.

Расчёт основного времени поясним на примере определения t_o при сверлении отверстия ∅1 мм в пакете печатных плат толщиной 3 мм (рис. 6.16).

Полная глубина сверления с учетом подхода Δ_1 к плате и выходу сверла Δ_2 из пакета составит

$$L = \Delta_1 + l + \Delta_2.$$

Обычно зазор Δ между инструментом на подход и выход задается от 0,1 до 0,5 мм. Тогда

$$L = 0,3 + 3 + 0,3 = 3,6 \text{ мм}.$$

Время на прохождение сверлом этого расстояния при подаче $S = 0,05$ мм/об и

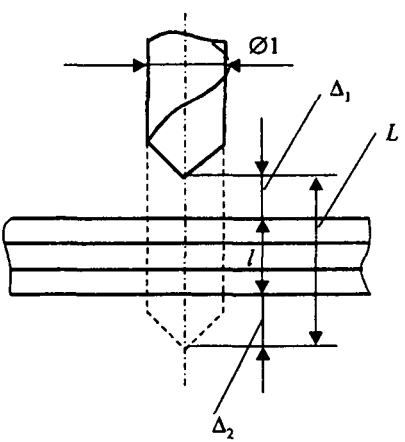


Рис. 6.16. Схема расчета глубины сверления

скорости резания $V = 50$ м/мин составит

$$t_o = \frac{L \cdot \pi \cdot d}{S \cdot V \cdot 1000} = \frac{3,6 \cdot 3,14 \cdot 3}{0,05 \cdot 50000} \cong 0,014 \text{ мин.}$$

Если рассматривается операция пайки, то следует по справочнику определить, какое время задается для принятого припоя на пайку. Например, для припоя ПОС-61, при пайке выводов ∅0,5...0,8 мм, время пайки составляет 5...10 с. Принимаем на прогрев соединения 3 с и на оплавление 5 с, время пайки составит 8 с. В расчетах $t_o = 8$ с.

При штамповке, формовке и других операциях, где в прессе рабочий ползун совершает возвратно-поступательное движение, расчет t_o проводится, исходя из выбранных двойных ходов в минуту.

Например, при пробивке базовых отверстий на печатной плате по характеристикам пресса выбираем $n = 100$ дв.х/мин, тогда $t_o = \frac{60}{100} = 0,6$ с.

Для серийного производства характерной является переналадка оборудования и смена оснастки на изготовление новой партии изделий. Время, затрачиваемое на эти цели, называется подготовительно-заключительным и обозначается $T_{п.з}$. При этом штучное калькуляционное время определится как

$$T_{шт\,к} = T_{шт} + \frac{T_{п\,з}}{N},$$

где $T_{шт.к}$ — время штучное калькуляционное; N — количество изделий в партии.

Для автоматического оборудования время одной операции определяется по формуле

$$T_ц = t_{р.х} + t_{х.х},$$

где $T_ц$ — время цикла автомата на одну операцию; $t_{рх}$ — время на выполнение рабочих ходов, аналог t_o; $t_{хх}$ — время на выполнение холостых ходов, аналог $t_в$.

Производительность автомата составит

$$Q = \frac{1}{T_ц}.$$

Обычно производительность автоматов и другого оборудования выбирают из технических характеристик, указываемых в справочниках или

паспортных данных. Например, установка ИМС на ПП на автомате такой-то марки выполняется со скоростью 2000 шт/ч. Значит, одна ИМС устанавливается за 1,8 с. Если на плате требуется установить 120 ИМС, то операция по их установке будет выполнена за 216 с.

Для повышения производительности труда и уменьшения трудоемкости операций следует проанализировать выражение

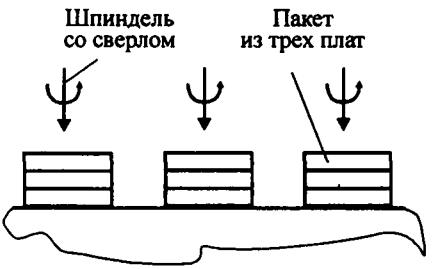


Рис. 6.17. Параллельная обработка печатных плат несколькими параллельными инструментами

$$T_{\text{шт.к}} = t_{\text{о}} + t_{\text{в}} + t_{\text{орг}} + t_{\text{тех}} + t_{\text{пер}} + \frac{T_{\text{п.з}}}{N}.$$

Если бы $T_{\text{шт.к}} = t_{\text{о}}$, это было бы идеальное производство. В нем нет непроизводительных затрат.

Для уменьшения $t_{\text{о}}$ применяют параллельную обработку. Например, многошпиндельное сверление печатных плат, одновременное сверление не одной, а нескольких плат в пакете (рис. 6.17).

При пайке погружением печатных плат сразу все соединения подвергаются пайке.

Для уменьшения $t_{\text{в}}$ используют быстрозажимные устройства, многоместную обработку, когда в одном приспособлении закрепляются несколько заготовок, применяют механизированные приводы вместо ручных и др.

Чтобы уменьшить $t_{\text{орг}}$, следует использовать программируемые комплектовщики, обеспечивающие быстрое снабжение рабочих мест комплектующими изделиями, инструментом, заготовками.

Для уменьшения $t_{\text{тех}}$ оборудование должно быть надежным, обеспечивающим устойчивое сохранение установленных технологических режимов работы.

Время перерывов $t_{\text{пер}}$ устанавливается согласно санитарным нормам и его произвольно не уменьшают.

Для уменьшения $T_{\text{п.з}}$ используют станки с программным управлением, для которых достаточно поменять программы, чтобы начать производство следующей партии изделий.

Особенно перспективными являются гибкие производственные комплексы, состоящие из гибких производственных модулей, управление которыми проводится от централизованной АСУ ТП.

Когда существующий ТП уже не дает роста производительности труда, следует его изменять. В противном случае производство станет не конкурентоспособным, морально устаревшим. Как пример можно привести обработку отверстий в трудно обрабатываемых материалах. Обычными методами, со снятием стружки, это происходило за часы, обработка лазером занимает минуты. Контроль характеристик печатных узлов ручным способом (прозвонкой) занимает много времени, в то же время использование тестового контроля аппаратуры снижает время контрольных операций во много раз.

Можно резко повысить производительность производства и снизить трудоемкость выполнения операций, однако это может вызвать увеличение стоимости готовой продукции. Поэтому основным критерием является себестоимость выполнения технологической операции.

6.7. Технологическая себестоимость

Технологическая себестоимость (затраты на изготовление продукции) рассчитывается по выражению

$$C = A + \frac{B}{N},$$

где A — текущие (переменные) затраты, руб; B — единовременные (постоянные) затраты, руб; N — программа выпуска изделий, шт.

$$A = C_{\text{м}} + C_{\text{з}} + C_{\text{н.р}},$$

где $C_{\text{м}}$ — затраты на материал; $C_{\text{з}}$ — затраты на зарплату основных рабочих; $C_{\text{н.р}}$ — накладные расходы на электроэнергию, воду, ремонт и т. п.;

$$C_{\text{М}} = mq - m_0 q_0,$$

где m — норма расхода материала на изделие (кг, м, дм^2); q — стоимость единицы материала; m_0 — утилизованный остаток материала, руб; q_0 — стоимость единицы утилизованного остатка материала;

$$C_{\text{з}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{T_{i\text{шт}} \cdot l_i}{60} \left(1 + \frac{12}{100}\right),$$

где $T_{i\text{шт}}$ — норма штучного времени на операцию, мин; l_i — тарифная ставка рабочего в единицу времени; $C_{\text{н.р}}$ — накладные расходы — ориентировочно берется от зарплаты основных рабочих и составляет 70…300 %;

$$B = C_{з} + C_{о},$$

где $C_{з}$ — зарплата наладчиков оборудования, руб; $C_{о}$ — стоимость запускаемого оборудования (оснастки) для производства новой серии (партии) изделий, руб;

$$C_{з} = \frac{T_{н} \cdot l_{н}}{60}\left(1 + \frac{12}{100}\right),$$

где $T_{н}$ — время наладки оборудования, мин; $l_{н}$ — тарифная ставка наладчика в единицу времени.

6.8. Выбор наиболее экономичного варианта ТП по себестоимости

Разработка ТП — задача многовариантная. Например, операция пайки может выполняться паяльником, окунанием в расплавленный припой, пайкой волной, а может быть заменена на механическое соединение накруткой. Основным критерием выбора варианта являются затраты, т. е. себестоимость данного ТП.

На рис. 6.18 приведены кривые себестоимости в зависимости от программы (объема) выпуска изделий двух вариантов ТП.

Себестоимость первого варианта

$$C_1 = A_1 + \frac{B_1}{N}.$$

Себестоимость второго варианта

$$C_2 = A_2 + \frac{B_2}{N}.$$

При выпуске определенного количества изделий оба варианта могут быть равноценны, тогда себестоимость первого варианта

$$A_1 + \frac{B_1}{N} = A_2 + \frac{B_2}{N}.$$

Решая это равенство относительно N, получим

$$N = \frac{B_2 - B_1}{A_1 - A_2}.$$

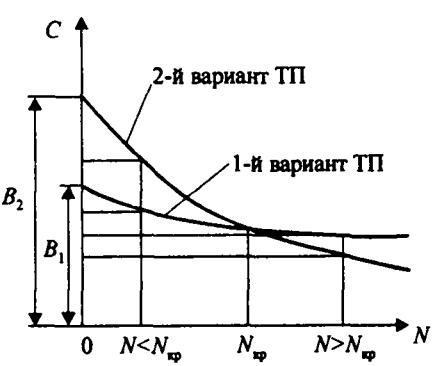


Рис. 6.18. Графики выбора наиболее экономичного ТП по себестоимости

Обозначим N как $N_{кр}$. Тогда при программе $N < N_{кр}$ выгоден 1-й вариант, а при $N > N_{кр}$ — 2-й вариант.

Первый вариант имеет дешевую оснастку (B_1), но менее производительную, чем у второго варианта, у которого оснастка дороже (B_2), но и более производительная.

При малой программе дорогая оснастка разложится на себестоимость изделия и резко ее повысит, поэтому ее более выгодно использовать при большей программе выпуска. Однако во втором случае возможно придется больше платить рабочему, так как оснастка сложнее и требуется рабочий с более высоким разрядом, но производительность, т. е. трудоемкость, будет меньше, чем в первом случае.

Чтобы снизить технологическую себестоимость, необходимо уменьшать входящие в нее составляющие: уменьшать отходы за счет правильного раскроя материала, покупать менее дорогие материалы, применять роботы-манипуляторы вместо рабочих, применять энергосберегающие ТП и др.

Контрольные вопросы

1. Что называется изделием?
2. Перечислите типы производств, чем они характеризуются?
3. Перечислите основные этапы разработки ТП.
4. Что является исходными данными для разработки ТП?
5. Что такое типовой ТП?
6. Перечислите основные этапы разработки маршрутного и операционного ТП.
7. Напишите условия получения заданной точности.
8. Чем определяется качество поверхностного слоя?
9. Перечислите классы шероховатости.

7. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОСХЕМ

7.1. Общие сведения о микросхемах и технологии их изготовления

Тактико-технические, конструктивно-технологические, эксплуатационные и экономические характеристики ЭА определяют примененные в ней *микросхемы* (МС), выполняющие функции преобразования, хранения, обработки, передачи и приема информации.

Микросхемой (интегральной микросхемой — ИМС) называют функционально законченный электронный узел (модуль), элементы и соединения в котором конструктивно неразделимы и изготовлены одновременно в едином ТП в общем кристалле-основании.

Теория, методы расчета и изготовления микросхем составляют основу микроэлектроники — современной наукоемкой отрасли техники.

По конструктивно-технологическому исполнению МС делятся на полупроводниковые и гибридно-пленочные. *Полупроводниковые* МС имеют в своей основе монокристалл полупроводникового материала (обычно кремния), в поверхностном слое которого методами *литографии* и *избирательного легирования* создаются транзисторы, диоды, резисторы и (иногда) конденсаторы, а соединения между ними формируются по поверхности кристалла *тонкопленочной технологией.* Полупроводниковые МС бывают *однокристальные (монолитные)* и *многокристальные (микросборки).* Однокристальная МС может иметь индивидуальный герметизированный корпус с внешними выводами для монтажа на коммутационной (печатной) плате, или быть *бескорпусной* и входить в состав микросборки.

Многокристальная микросборка представляет собой совокупность бескорпусных МС, смонтированных на общей *коммутационной плате.* В качестве компонентов в микросборке могут присутствовать бескорпусные согласующие резисторы и развязывающие конденсаторы. Вследствие высокой насыщенности связей коммутационная плата выполняется многоуровневой и, таким образом,



Рис. 7.1. Укрупненная схема ТП изготовления полупроводниковых (монолитных) ИМС

является миниатюрным аналогом многослойной ПП. При изготовлении коммутационной платы используют как тонкопленочную, так и *толстопленочную* технологии.

Гибридно-пленочные МС состоят из пленочных пассивных элементов (резисторов и конденсаторов), коммутационных проводников, нанесенных непосредственно на подложку из изоляционного материала, и бескорпусных полупроводниковых кристаллов (транзисторов, диодов, диодных матриц, несложных ИМС), монтируемых на той же подложке. Пассивные элементы и проводники выполняются по тонкопленочной или толстопленочной технологии.

В качестве активных элементов в полупроводниковых микросхемах используются *униполярные (полевые)* транзисторы со структурой «металл — диэлектрик (оксид) — полупроводник» (МДП- или МОП-*транзисторы*) и *биполярные* транзисторы. В соответствии с этим все полупроводниковые ИМС делятся на три группы: *биполярные, униполярные* (МДП или МОП) и *биполярно-полевые.*

Число элементов в ИМС характеризует ее *степень интеграции.* По этому параметру все микросхемы условно делят на малые (МИС — до 10^2 элементов на кристалл), средние (СИС — до 10^3), большие (БИС — до 10^4),

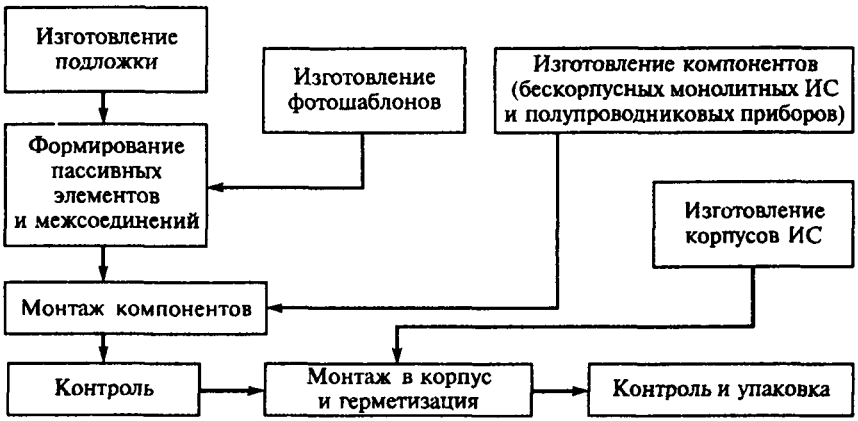


Рис. 7.2. Укрупненная схема ТП изготовления гибридно-пленочных МС

сверхбольшие (СБИС — до 10^6), ультрабольшие (УБИС — до 10^9) и гигабольшие (ГБИС — более 10^9 элементов на кристалл).

Наиболее высокой степенью интеграции обладают цифровые ИМС с регулярной структурой: схемы динамической и статической памяти, постоянные и перепрограммируемые ЗУ. Это связано с тем, что в таких схемах доля участков поверхности ИМС, приходящаяся на межсоединения, существенно меньше, чем в схемах с нерегулярной структурой.

Укрупненные схемы ТП изготовления полупроводниковых (монолитных) и гибридно-пленочных микросхем приведены соответственно на рис. 7.1 и 7.2. В последующих разделах главы приведено описание характерных особенностей выполнения отдельных технологических операций, определяющих основные параметры ИМС.

7.2. Изготовление монокристалла полупроводникового материала

Монокристалл — отдельный однородный кристалл, имеющий во всем объеме единую кристаллическую решетку и зависимость физических свойств от направления (анизотропия). Электрические, магнитные, оптические, акустические, механические и другие свойства монокристалла связаны между собой и обусловлены кристаллической структурой, силами связи между атомами и энергетическим спектром электронов.

Монокристаллы для полупроводниковой промышленности (кремний, германий, рубин, гранаты, фосфид и арсенид галлия, ниобат лития и др.) изготавливаются, как правило, методом Чохральского путем вытягивания из

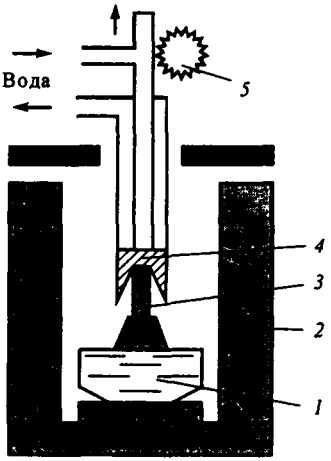


Рис. 7.3. Схема установки для выращивания монокристаллов по методу Чохральского

расплава с помощью затравки. На рис. 7.3 приведена схема установки для выращивания монокристаллов по методу Чохральского. Тигель с расплавом *1* размещается в печи *2*. Затравка *3*, охлаждаемая холодильником *4*, медленно поднимается под действием механизма вытягивания *5*, увлекая за собой монокристалл полупроводникового материала. Монокристалл растет на затравке со скоростью до 80 мм/ч. Расплав смачивает затравку и удерживается на ней силами поверхностного натяжения. Температуру расплава и скорость кристаллизации можно изменять независимо. Отсутствие прямого контакта растущего монокристалла с тиглем и возможность изменения его геометрической формы позволяют получать бездислокационные монокристаллы. Получаемые методом Чохральского монокристаллы имеют форму цилиндра длиной до 1 м и более и диаметром 20...300 мм.

Монокристалл после охлаждения калибруют по диаметру до заданного размера с точностью ±1 мм. Затем проводится травление его поверхности на глубину 0,3...0,5 мм и ориентация по заданному кристаллографическому направлению (для Si, например, чаще всего по оси <111>), чтобы получить после резки пластины, ориентированные строго в заданной плоскости. Правильная ориентация пластин обеспечивает высокую воспроизводимость электрофизических параметров создаваемых на пластине приборов методом *диффузии, эпитаксии* и др.

7.3. Резка монокристалла и получение пластин

Резку монокристаллов на пластины осуществляют чаще всего абразивными дисками с режущей кромкой, покрытой алмазной крошкой размером 40...60 мкм. Толщина режущей алмазной кромки диска составляет 0,18...0,20 мм, при этом ширина реза получается 0,25...0,35 мм.

Так как на поверхности пластин остаются царапины, сколы, трещины и другие дефекты, нарушающие однородность структуры поверхностного слоя, пластины шлифуют, травят и полируют. При шлифовании достигается неплоскопараллельность пластин не более 3 мкм и прогиб по поверхности не более 10 мкм. При травлении удаляется нарушенный слой толщиной 5...30 мкм и снимаются внутренние напряжения, возникшие в процессе шлифования.

Окончательная тонкая доводка поверхности пластин проводится полированием абразивными порошками или пастами, а затем химико-механическим способом с применением суспензий, золей и гелей. В результате получают полупроводниковую пластину диаметром 20...250 мм толщиной от десятков до нескольких сотен микрометров с шероховатостью обработанной поверхности не более 0,04 мкм.

7.4. Изготовление фотошаблонов

Фотошаблоны широко применяются в технологии ИМС как на стадии формирования активных элементов в полупроводниковом материале, так и при создании пассивных элементов и межсоединений.

Фотошаблон — стеклянная пластина (подложка) с нанесенным на ее поверхности маскирующим слоем — покрытием, образующим трафарет с прозрачными и непрозрачными для оптического излучения участками. В процессе *фотолитографии* слой *фоторезиста* экспонируется в соответствии с рисунком покрытия, имеющегося на фотошаблоне.

Подложку фотошаблона выполняют либо из обычного стекла (при экспонировании светом с длиной волны $\lambda > 300$ нм), либо из кварцевого стекла (при $\lambda < 300$ нм). В качестве материала маскирующего слоя фотошаблона обычно используется хром, оксиды хрома, железа и др., образующие твердые износостойкие покрытия.

К фотошаблонам для производства полупроводниковых структур предъявляется комплекс требований, к которым в первую очередь следует отнести следующие: оптическая плотность маскирующего материала должна быть не менее 2,0; толщина маскирующего материала — не более 100 нм; его отражательная способность не выше 15 %; неплоскостность — от нескольких мкм до десятков мкм (для разных классов фотошаблонов); микродефектность порядка 0,1 $см^{-2}$; краевая четкость рисунка не ниже 0,1 мкм для элементов изображения с размером менее 1 мкм.

7.5. Полупроводниковые микросхемы

Конструкция полупроводниковой МС полностью определяется ее *физической структурой* (совокупностью слоев в кристалле, отличающихся материалом и электрофизическими свойствами) и *топологией* (формой, размерами, относительным расположением отдельных областей и характером межсоединений по поверхности кристалла). Можно также сказать, что структура — это чертеж поперечного сечения кристалла ИМС, а топология — вид в плане (рис. 5 цветной вклейки).

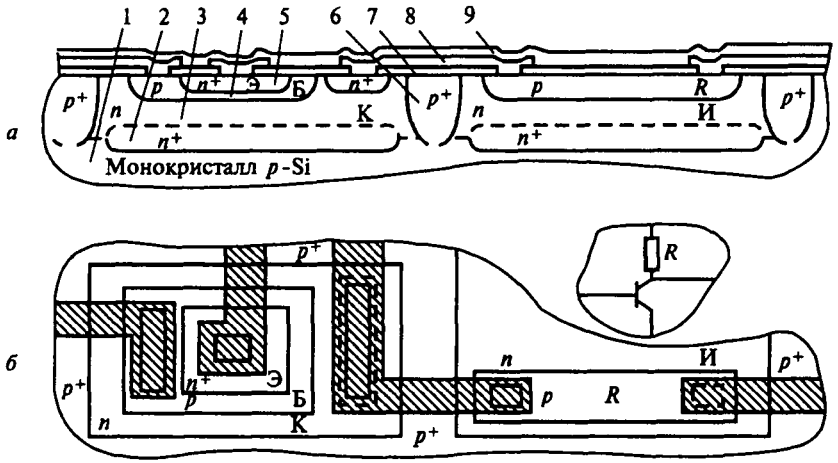


Рис. 7.4. Фрагмент ИМС:

а — структура; *б* — топология; *1* — исходная монокристаллическая пластина — подложка; *2* — скрытый слой; *3* — эпитаксиальный слой (он же коллекторный); *4* — базовый слой; *5* — эмиттерный слой; *6* — разделительный слой; *7* — изолирующий слой с контактными окнами; *8* — слой металлизации; *9* — защитный слой (обычно SiO_2)

На рис 7.4, *а* приведен фрагмент структуры ИМС, представляющей собой *n-p-n*-транзистор, и включенный в коллекторную цепь резистор, а на рис. 7.4, *б* — топология этого же участка.

Каждый из слоев *2*—*6* представляет собой совокупность отдельных островков (областей), имеющих одинаковые толщины, тип проводимости (электронная *n* или дырочная *p*) и характер распределения примеси по толщине. Это достигается одновременным введением примеси через окна защитной маски из SiO_2, формируемой предварительно на поверхности пластины-кристалла. В отличие от слоев *2*—*6* слои *7*, *8* и *9* получают путем формирования сплошной пленки и последующего избирательного травления с использованием фотошаблона. В результате изолирующий слой *7* (SiO_2) содержит контактные окна, слой металлизации *8* (обычно Al) — систему соединительных проводников и периферийные монтажные площадки, а слой *9* — окна над монтажными площадками.

Приведенная структура получила название *эпитаксиально-планарной*. Она предполагает взаимную изоляцию смежных элементов за счет обратносмещенных *p-n*-переходов на границах изолирующего слоя. Высоколегированный скрытый слой (n^+) служит для уменьшения сопротивления коллекторов транзисторов и за счет этого повышения их быстродействия. Области n^+ под коллекторными контактами исключают образование *потенциального барьера (барьера Шотки)*, обеспечивая, таким образом, омический контакт со слаболегированным коллектором, и принадлежат эмиттерному слою.

Слои *2—6*, находящиеся в объеме полупроводникового кристалла, формируются с помощью однотипного повторяющегося цикла (рис. 7.5): окисление поверхности (SiO_2) — фотолитография с образованием оксидной маски — внедрение легирующей примеси через окна маски — стравливание окисла. Рисунок оксидной маски определяется рисунком фотошаблона, используемого в процессе фотолитографии. Таким образом, для создания всех слоев требуется комплект фотошаблонов с различными рисунками.

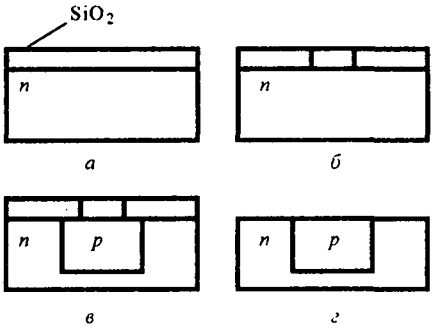


Рис. 7.5. Последовательность формирования топологического слоя в объеме кристалла:

а — окисление поверхности; *б* — фотолитография; *в* — внедрение примеси; *г* — стравливание окисла

В соответствии с этим циклом последовательность формирования полупроводниковой структуры следующая. В исходной пластине-подложке *p*-типа формируются области скрытого слоя (n^+). Далее осаждается сплошной монокристаллический (эпитаксиальный) слой кремния *n*-типа, поверхность которого окисляется. Затем формируются области разделительного слоя (p^+) с таким расчетом, чтобы они сомкнулись с подложкой. Образующиеся при этом островки эпитаксиального слоя образуют коллекторный слой (*n*). Внутри коллекторных областей формируются базовые *p*-области (базовый слой), а внутри базовых областей — эмиттерные (эмиттерный n^+-слой).

В дальнейшем обработка происходит на поверхности — формируются изолирующий слой (SiO_2), слой металлизации (Al) и защитный слой (SiO_2). При этом обработка осуществляется по циклу «нанесение сплошной пленки — фотолитография».

Таким образом, для получения рассматриваемой структуры необходим комплект из семи фотошаблонов.

7.6. Легирование методом термической диффузии примесей

В подавляющем большинстве случаев легирующая примесь вводится в монокристаллический кремний с целью изменения типа проводимости и образования *p-n*-перехода на определенной глубине. Изменение типа проводимости происходит, если максимальная концентрация введенной примеси превышает исходную ($N_{исх}$) концентрацию. Образование *p-n*-перехода происходит на глубине X_n, где концентрация введенной примеси оказывается равной исходной.

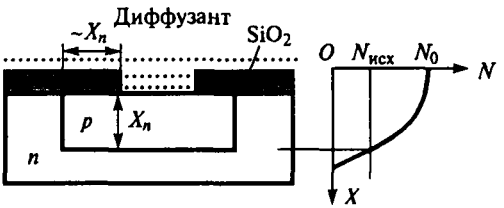


Рис. 7.6. Принцип образования *p-n*-перехода

При термической диффузии (рис. 7.6) максимальная концентрация примеси всегда на поверхности (N_0) и монотонно убывает с глубиной.

Как известно, диффузия атомов или молекул в любой среде (газовой, жидкой, твердой) описывается следующим уравнением (*1-е уравнение диффузии*):

$$J = -D \cdot \frac{\partial N}{\partial X}, \tag{7.1}$$

где J — плотность потока частиц, $см^{-2} \cdot с^{-1}$; D — коэффициент диффузии, $см^2 \cdot с^{-1}$; X — глубина проникновения частиц в направлении X, см (в рассматриваемом случае — по нормали к поверхности кристалла); N — концентрация частиц (атомов примеси), $см^{-3}$.

Множитель $\partial N/\partial X$ представляет собой градиент концентрации примеси, $см^{-4}$, в направлении X. С повышением температуры процесса коэффициент диффузии быстро (экспоненциально) возрастает, так как возрастает энергия атомов легирующей примеси. В плотной структуре оксидной маски (SiO_2) коэффициент диффузии существенно меньше, за счет чего и обеспечивается избирательность легирования.

При высокой температуре процесса (порядка 1000 °С) атомы как исходной, так и вводимой примеси ионизированы и образуют электрическое поле, всегда ускоряющее процесс диффузии. Зависимость коэффициента диффузии (в логарифмическом масштабе) от $t°$ и N_0 при двух значениях исходной концентрации $N_{исх}$ приведена на рис. 7.7.

Концентрация введенной примеси с глубиной меняется непрерывно, что описывается дифференциальным уравнением (*уравнением непрерывности*):

$$\partial J \cdot \partial t = -\partial N \cdot \partial X. \tag{7.2}$$

Отсюда следует, что в элементарном объеме кристалла толщиной ∂x и площадью в 1 $см^2$ за время ∂t происходит накопление примеси ($\partial N > 0$), если плотность потока убывает ($\partial J < 0$), и наоборот.

Решая совместно уравнения (7.1) и (7.2) можно получить *2-е уравнение диффузии*, отражающее протекание процесса диффузии во времени:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 N}{\partial X^2}. \tag{7.3}$$

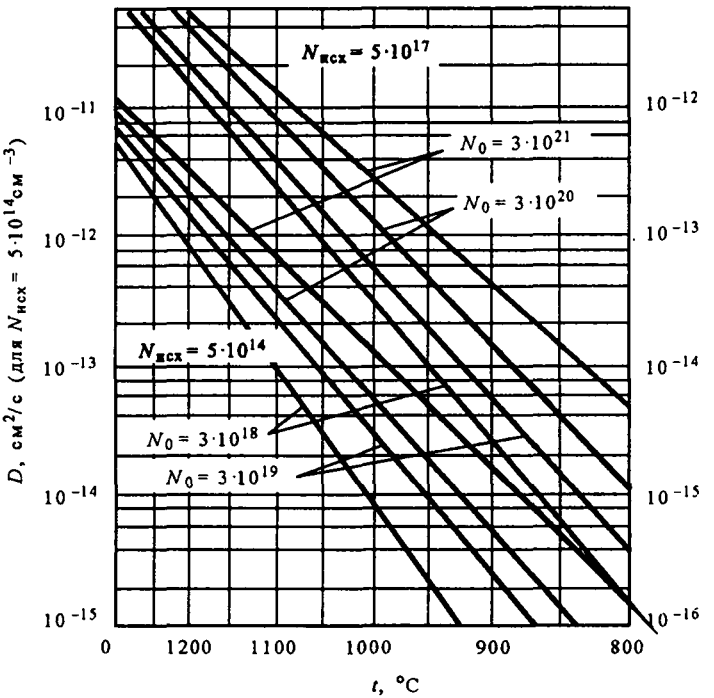


Рис. 7.7. Зависимость коэффициента диффузии фосфора и бора в кремний от температуры процесса диффузии: $N_{исх}$ и N_0 — исходная и поверхностная концентрации примеси, см$^{-3}$

Решение этого уравнения при определенных граничных условиях представляет собой функцию распределения $N(x)$.

На практике используются два варианта проведения процесса — диффузия из постоянного внешнего источника и диффузия из конечного поверхностного источника.

В первом случае внешний (вне рабочей камеры) источник постоянно поставляет к поверхности пластин-заготовок примесь в газообразном состоянии, причем ее расход отрегулирован так, что на поверхности пластины поддерживается постоянная концентрация N_0, хотя примесь при этом поступает в глубь кристалла. Процесс выполняют до тех пор, пока p-n-переход не окажется на заданной глубине.

При N_0 = const решение уравнения (7.3) приводит к функции:

$$N = N_0 \cdot \mathrm{erfc}\left(\frac{X}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}}\right) = N_0 \cdot \mathrm{erfc}\,(V), \qquad (7.4)$$

где $\mathrm{erfc}(V) = 1 - \mathrm{erf}(V)$ — дополнение функции ошибок $\mathrm{erf}(V)$ (до единицы). Значения функции $\mathrm{erfc}(V)$ приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1. **Значения функции erfc *V***

V	erfc *V*	*V*	erfc *V*
0,0	1,00000	2,6	$2{,}36\cdot10^{-4}$
0,1	0,88754	2,7	$1{,}343\cdot10^{-4}$
0,2	0,77730	2,8	$7{,}5\cdot10^{-5}$
0,3	0,67135	2,9	$4{,}11\cdot10^{-5}$
0,4	0,57161	3,0	$2{,}21\cdot10^{-5}$
0,5	0,47950	3,1	$1{,}16\cdot10^{-5}$
0,6	0,39614	3,2	$6{,}02\cdot10^{-6}$
0,7	0,32220	3,3	$3{,}05\cdot10^{-6}$
0,8	0,25790	3,4	$1{,}52\cdot10^{-6}$
0,9	0,20309	3,5	$7{,}43\cdot10^{-7}$
1,0	0,15730	3,6	$3{,}55\cdot10^{-7}$
1,1	0,11979	3,7	$1{,}67\cdot10^{-7}$
1,2	0,08969	3,8	$7{,}68\cdot10^{-8}$
1,3	0,06599	3,9	$3{,}48\cdot10^{-8}$
1,4	0,04771	4,0	$1{,}54\cdot10^{-8}$
1,5	0,03389	4,1	$6{,}7\cdot10^{-9}$
1,6	0,02365	4,2	$2{,}86\cdot10^{-9}$
1,7	0,01621	4,3	$1{,}19\cdot10^{-9}$
1,8	0,01091	4,4	$4{,}89\cdot10^{-10}$
1,9	0,00721	4,5	$1{,}96\cdot10^{-10}$
2,0	$4{,}678\cdot10^{-3}$	4,6	$7{,}74\cdot10^{-11}$
2,1	$2{,}971\cdot10^{-3}$	4,7	$2{,}99\cdot10^{-11}$
2,2	$1{,}863\cdot10^{-3}$	4,8	$1{,}13\cdot10^{-11}$
2,3	$1{,}143\cdot10^{-3}$	4,9	$4{,}21\cdot10^{-12}$
2,4	$6{,}89\cdot10^{-4}$	5,0	$1{,}53\cdot10^{-12}$
2,5	$4{,}07\cdot10^{-4}$	—	—

Поскольку в данном случае может быть создана и выдержана до конца процесса предельно высокая концентрация на поверхности кристалла, этот одностадийный процесс рекомендуется для областей n^+ и p^+ (эмиттерные области в биполярных транзисторах, истоки и стоки МДП-транзисторов). Характер изменения профиля распределения примеси при постоянном внешнем источнике с течением времени приведен на рис. 7.8, из которого видно, что с течением времени p-n-переход углубляется. Для вычисления необходимого времени прохождения процесса технологу должны быть заданы разработчиком физической структуры параметры X_n, N_0 и $N_{исх}$.

В случае конечного поверхностного источника (вторая стадия двухстадийного процесса) поверхность кристалла содержит определенное количество примеси на единицу площади, и процесс сводится к перераспределению

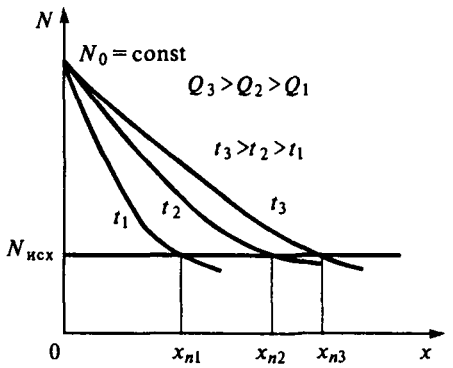


Рис. 7.8. Характер изменения профиля распределения примеси при постоянном внешнем источнике с течением времени

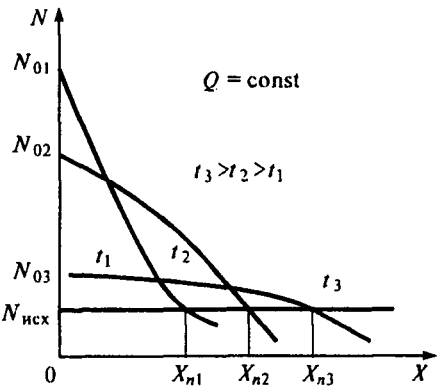


Рис. 7.9. Изменение профиля распределения примеси с течением времени при конечном поверхностном источнике

(разгонке) ее по глубине до тех пор, пока p-n-переход не углубится на заданную величину $X_п$. Таким образом, количество примеси, введенное предварительно в поверхностный слой, или доза легирования Q, см$^{-2}$, сохраняется постоянной до конца процесса разгонки.

При Q = const решение уравнения (7.3) приводит к функции:

$$N = \frac{Q}{\sqrt{\pi \cdot D_р t_р}} \cdot e^{-\left(\frac{X}{2\sqrt{D_р t_р}}\right)^2}, \qquad (7.5)$$

где $D_р$ и $t_р$ — коэффициент диффузии и время процесса разгонки.

При отсутствии внешнего источника примеси разгонка происходит при непрерывном уменьшении концентрации примеси на поверхности.

Характер изменения профиля распределения примеси с течением времени приведен на рис. 7.9, из которого следует, что концентрация примеси на поверхности постепенно убывает, p-n-переход углубляется, а доза легирования Q, характеризуемая площадью под кривой распределения, остается неизменной.

Необходимая доза легирования Q обеспечивается на первой стадии процесса (загонка примеси) с постоянным внешним источником примеси:

$$Q = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot N_{0з} \sqrt{D_з t_з},$$

где $D_з$ и $t_з$ — коэффициент диффузии и время процесса загонки; $N_{0з}$ — концентрация примеси, поддерживаемая на поверхности пластины в течение процесса загонки.

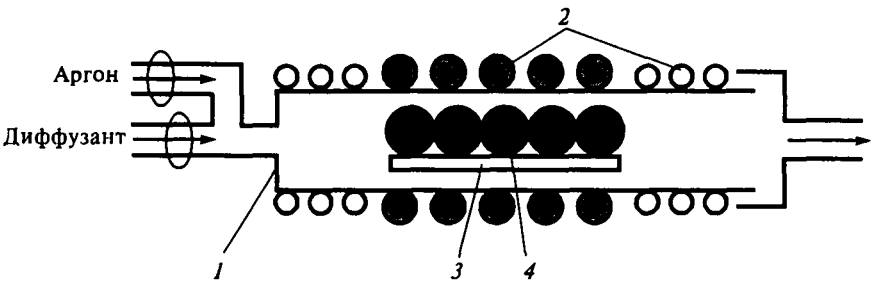


Рис. 7.10. Схема рабочей камеры диффузионной печи

Двухстадийный процесс рекомендуется для областей с умеренной концентрацией примеси на поверхности и относительно глубоких (базовые области биполярных транзисторов, изолирующие «карманы» в КМДП-структурах). В этом случае разработчиком структуры также должны быть заданы параметры слоя X_n, N_0 и $N_{исх}$ после второй стадии.

Двухстадийный процесс позволяет осуществлять контроль результатов после первой стадии и корректировать режим второй стадии.

Схема рабочей камеры диффузионной печи приведена на рис. 7.10. Собственно камера представляет собой кварцевую (или керамическую) трубу *1*, снабженную резистивными нагревателями *2* (три секции с независимым регулированием температуры). Крайние секции поддерживают малый градиент температуры, обеспечивающий средней секции рабочую температуру до 1250 °С с высокой точностью (до ±0,25 °С). Именно в этой части камеры на кварцевом (или керамическом) держателе *3* располагаются обрабатываемые пластины *4*, имеющие на рабочей поверхности оксидную маску. При выполнении загонки примеси или одностадийного процесса диффузии в камеру из внешнего источника непрерывно подается диффузант, представляющий смесь легирующей примеси (акцептор бор или донор фосфор) с транспортирующим газом (аргон).

При разгонке примеси в двухстадийном процессе в камеру непрерывно подается только аргон, поддерживающий чистоту рабочей зоны. Побочные продукты процесса на выходе собираются специальными сборниками.

В зависимости от диаметра одновременно может обрабатываться до трех десятков пластин. Технические характеристики диффузионной однозонной печи СДО-125/3-12 следующие:

Количество технологических труб, шт. 3
Диапазон рабочих температур, °С ..... 700...1250
Диаметр рабочей трубы, мм 120
Диаметр обрабатываемых пластин, мм ..... до 80

Минимальная длина рабочей зоны (мм) с неравномерностью распределения температуры, °С	
±0,25	450
±0,5	600
Стабильность поддержания температуры в пределах рабочей зоны, °С	±0,25
Воспроизводимость температурного уровня, °С	±0,5
Время выхода печи на максимальную рабочую температуру, ч	2
Максимальная мощность, потребляемая в установившемся режиме, кВт	18
Размеры, мм	1852×630×2150
Масса, кг	800

7.7. Легирование методом ионной имплантации

При ионной имплантации атомы легирующей примеси ионизируют в сильном электрическом поле и облучают потоком ионов поверхность пластины с подготовленной заранее оксидной маской (рис. 7.11). Имея при подлете к поверхности одинаковую энергию, ионы при вхождении в кремний испытывают многократные столкновения с ядрами и кулоновское взаимодействие с электронами атомов кремния. Это приводит к постепенному торможению ионов вплоть до полной остановки. Путь, пройденный отдельным ионом в кристалле кремния (длина пробега), является величиной случайной и для совокупности ионов, внедренных в кристалл, оценивается средним значением пробегов $\lambda_{ср}$.

Разброс отдельных пробегов относительно среднего значения оценивается средним квадратическим отклонением σ.

Параметры распределения пробегов $\lambda_{ср}$ и σ зависят от энергии ионов E и от эффективного диаметра атома примеси (иначе говоря от порядкового номера z в периодической системе элементов). Чем выше E и меньше z, тем больше $\lambda_{ср}$ и σ (табл. 7.2).

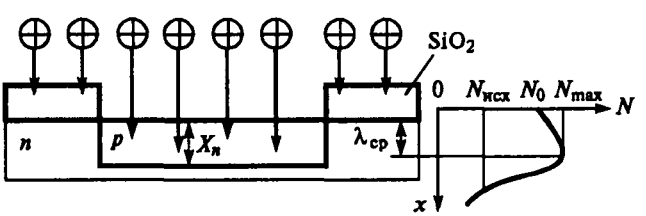


Рис. 7.11. Легирование ионной имплантацией

Таблица 7.2. **Параметры распределения ионов легирующих элементов в кремнии при ионной имплантации**

E, кэВ	B ($z = 5$)		Al ($z = 13$)		P ($z = 15$)		As ($z = 33$)	
	$\lambda_{ср}$, нм	σ, нм	$\lambda_{ср}$, нм	σ, нм	$\lambda_{ср}$, нм	σ, нм	$\lambda_{ср}$, нм	σ, нм
1	4	4	4	2	3	2	4	1
3	11	7	7	4	7	4	6	2
5	17	11	9	5	9	5	9	3
10	33	18	16	8	15	8	13	5
20	65	29	29	14	26	12	19	7
30	97	38	42	19	37	17	25	9
40	129	46	56	24	49	21	30	11
50	159	52	70	29	61	26	35	13
60	188	57	84	34	73	30	40	15
70	216	62	99	38	86	34	45	16
80	244	66	113	43	98	38	51	18
100	296	73	143	51	124	46	61	21
120	346	79	173	58	150	53	71	25
140	394	84	202	65	176	60	82	28
160	439	89	232	72	202	66	92	31
180	483	92	262	78	229	72	103	35
200	525	96	291	84	255	78	114	38
220	566	99	320	89	281	84	125	41
240	606	102	349	95	308	88	136	44
260	645	104	377	99	334	94	147	47
280	683	106	406	104	360	99	158	51
300	719	108	434	108	385	103	169	54
350	808	113	502	118	449	114	198	61
400	893	117	568	127	511	123	227	69
500	1053	124	696	142	631	140	285	83
600	1203	129	816	154	746	153	345	96
700	1346	133	931	164	857	165	405	108
800	1484	137	1041	173	963	175	465	120
900	1617	140	1146	180	1066	184	525	132
1000	1747	143	1247	187	1164	192	585	142

Если направление ионного потока не совпадает с главным кристаллографическим направлением в монокристалле кремния, то распределение примеси по глубине подчиняется гауссову закону:

$$N = \frac{Q}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{X-\lambda_{ср}}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2}.$$

К режимам имплантации относят кратность ионизации атомов примеси n (иначе говоря, число единичных зарядов, которые несет ион), ускоряющее напряжение $U_{уск}$, кВ и дозу легирования Q, см$^{-2}$.

Первые два параметра связаны с энергией, кэВ, простым соотношением:

$$E = nU_{уск}. \tag{7.6}$$

Доза легирования:

$$Q = \frac{Jt}{qn}, \tag{7.7}$$

где J — плотность ионного тока, А/см^2; t — время облучения, с; q — заряд электрона, $1{,}6 \cdot 10^{19}$ Кл.

Из выражений (7.6) и (7.7) следует, что повышение кратности ионизации до двух или трех уменьшает необходимое ускоряющее напряжение для достижения необходимой энергии, но в то же время увеличивает длительность облучения (или плотность ионного тока) для достижения необходимой дозы легирования. Кроме того, получение потока двух- или трехзарядных ионов требует повышения мощности, подводимой к разрядной камере установки. Таким образом, повышение кратности ионизации оправдано лишь в том случае, если рассчитанное при n = 1 ускоряющее напряжение превышает возможности установки.

В материале оксидной маски (SiO_2), имеющей более плотную структуру по сравнению с кремнием, имеет место более сильное торможение ионов, благодаря чему лишь незначительное количество ионов пронизывает маску и внедряются в кремний. За счет этого достигается избирательность легирования. При энергиях в десятки и сотни килоэлектронвольт ион способен при столкновении с ядрами кремния вызывать массовые смещения атомов в междоузлия решетки. В результате нарушения структуры монокристалла большое количество внедренной примеси оказывается пассивной, неспособной создавать подвижные носители заряда, а активная часть примеси создает носители с низкой подвижностью. Для восстановления нарушенного слоя и перевода всей внедренной примеси в активное состояние прибегают к отжигу поверхностного слоя путем облучения коротким (порядка 1 мс) и мощным импульсом инфракрасного излучения.

Преимущества ионной имплантации по сравнению с термической диффузией примеси следующие:

1) процесс не требует нагрева пластин и, следовательно, не приводит к изменению параметров ранее сформированных слоев (за счет диффузионной разгонки);

2) так как ионный пучок перпендикулярен к пластине, размеры легированной области точно соответствуют размерам окна в оксидной маске;

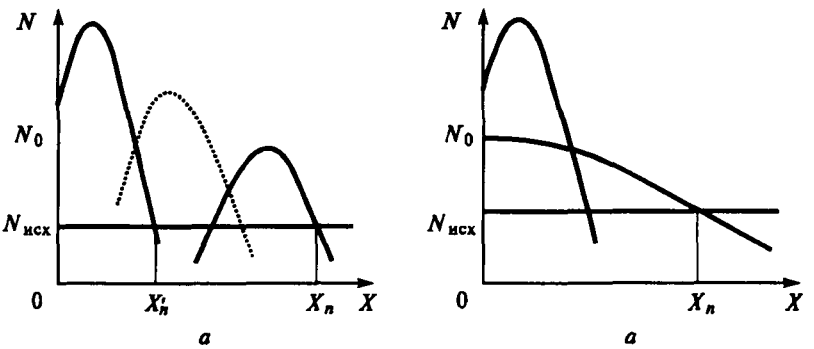


Рис. 7.12. Формирование глубоких профилей:

а — ступенчатый процесс; *б* — комбинирование имплантационной загонки с диффузионной разгонкой

3) количество введенной примеси точно дозируется (контролируется в процессе облучения).

Недостатком процесса ионной имплантации является то, что при постоянной энергии ионов невозможно получить глубоко залегающий переход с одновременным присутствием примеси на поверхности. В связи с этим на практике применяют один из процессов (рис. 7.12).

1. Ступенчатый процесс — непрерывное и глубокое распределение примеси от поверхности до перехода обеспечивается несколькими ступенями легирования при различных энергиях, причем первый (глубокий) профиль обеспечивает заданную глубину залегания p-n-перехода X_n, а последний (у поверхности) — необходимую поверхностную концентрацию N_0 (рис. 7.12, *а*).

2. Комбинированный процесс — имплантационная загонка примеси при низкой энергии обеспечивает необходимую дозу легирования Q и присутствие примеси на поверхности, а диффузионная разгонка — заданную глубину залегания p-n-перехода X_n (рис. 7.12, *б*).

Установка ионной имплантации представляет собой вакуумную камеру, состоящую из ряда блоков, последовательно состыкованных с помощью уплотнений из вакуумной резины. Из источника примесь в парообразном или газообразном виде попадает в разрядный блок (ионизатор), из которого отрицательным потенциалом в 20...25 кВ ионы вытягиваются в магнитный сепаратор (масс-анализатор). Здесь в постоянном магнитном поле происходит разделение траекторий ионов с различным электрическим зарядом так, что в следующий блок проходит моноэнергетический поток ионов (с расчетным значением n). В этом блоке с помощью системы электродов ионному пучку придается плоская (ленточная) форма и в следующем блоке (ускорителе) ионы разгоняются до необходимой энергии. В рабочую камеру, таким образом, проходит плоский (ленточный) ионный луч, неподвижный в

пространстве. Схема рабочей камеры (последнего блока установки) приведена на рис. 7.13.

Облучаемые пластины *5*, несущие оксидную маску, размещаются по периферии держателя (контейнера) *1* в несколько ярусов. В процессе облучения пластин неподвижным ленточным лучом *4* контейнер вращается и совершает возвратно-поступательное движение. Пластины, таким образом, постепенно набирают необходимую дозу легирования. Между пластинами располагаются датчики *3*, принимающие ту же дозу заряда, что и пластины.

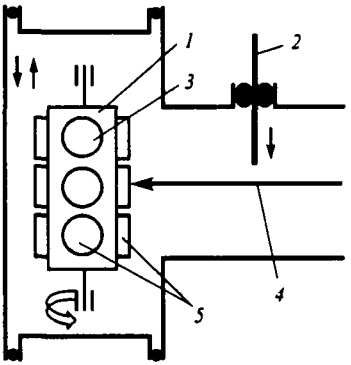


Рис. 7.13. Схема рабочей камеры установки ионной имплантации

По достижении необходимой дозы ($Q = \int_0^t Jdt$) системой контроля вырабатывается сигнал, отключающий ионный луч.

Перед выгрузкой контейнера с обработанными пластинами вакуумный затвор *2* отсекает рабочую камеру от остального объема установки, камеру открывают и проводят замену контейнера с пластинами. После закрытия камеры и открывания затвора вакуумные насосы восстанавливают рабочее давление (примерно 10^{-4} Па) в объеме установки, и начинается следующий цикл обработки.

Технические характеристики установки ионной имплантации «Везувий-9» следующие:

Тип разрядной камеры	Магнетронный
Максимальный ток разряда, А	5
Максимальное напряжение разряда, В	500
Напряжение экстракции ионов, кВ	25
Напряженность магнитного поля масс-сепаратора, А/м	$24 \cdot 10^4$
Угол поворота ионного пучка, град	110
Радиус равновесной траектории, м	0,3
Максимальный ионный ток, мкА:	
для 2-зарядных ионов	600
для 3-зарядных ионов	150
Максимальное ускоряющее напряжение, кВ	600
Количество пластин, обрабатываемых в одном цикле, шт., при диаметре пластин:	
75 мм	54
100 мм	36
Скорость движения контейнера с пластинами:	
вращательного, об/мин	20
возвратно-поступательного, цикл/мин.	6
Предельный вакуум в рабочем объеме установки, Па	$6{,}5 \cdot 10^{-4}$

7.8. Проектирование полупроводниковых резисторов в ИМС

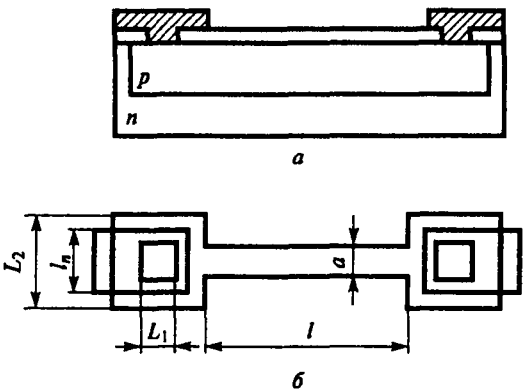


Рис. 7.14. Структура (*а*) и топология (*б*) полупроводникового резистора

Структура и топология резистора, сформированного в полупроводниковом материале, приведены на рис. 7.14. Сопротивление резистора складывается из сопротивления линейной части, которое подчиняется выражению $R = R_{сл}l/a$, и сопротивления приконтактных областей, которое определяется эмпирическим коэффициентом k, выраженным в долях $R_{сл}$.

$$R = R_{сл}\frac{l}{a} + 2R_{сл}k,$$

где l и a — соответственно длина и ширина линейной части резистора, мкм; $R_{сл}$ — удельное поверхностное сопротивление слоя, Ом.

Коэффициент k зависит от формы и размеров приконтактной области и ширины a линейной части резистора. Он определяется по номограммам, приведенным в табл. 7.3. Размер a должен быть минимально возможным, но следует учитывать, однако, возможности технологии и требования точности сопротивления (с уменьшением ширины точность уменьшается).

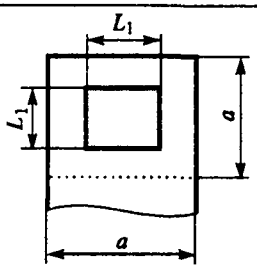
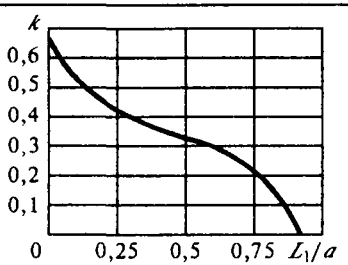
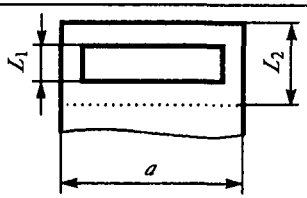
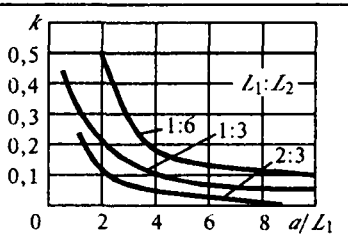
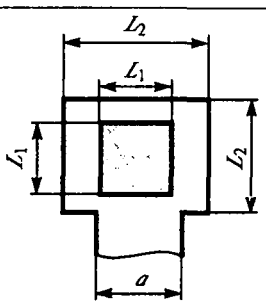
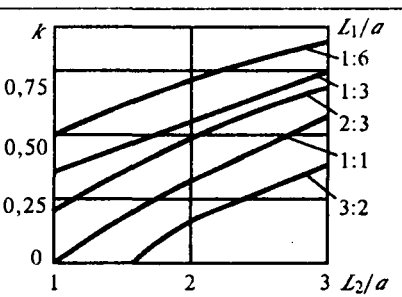
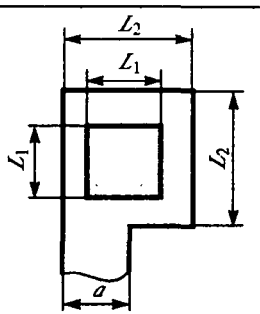
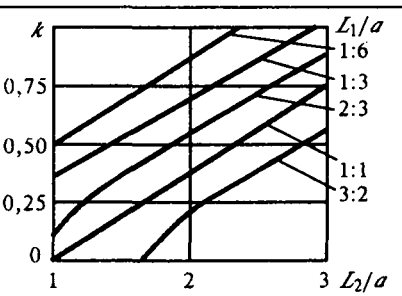
Расчет минимальных размеров приконтактных областей проводят по правилам, изложенным в § 7.10. После определения a и k из соотношения для R вычисляют длину l линейной части резистора. Для формирования резисторов могут быть использованы любые слои физической структуры ИМС. На практике находят применение резисторы на основе эмиттерного слоя (сопротивление в несколько десятков Ом), базового слоя (от сотен до нескольких тысяч Ом), слоя активной базы (десятки тысяч Ом, так называемые *ПИНЧ-резисторы*).

7.9. Фотолитография

Процессы легирования, а также наращивания слоев различных материалов призваны сформировать вертикальную физическую структуру ИМС. Необходимые форма и размеры элементов и областей в каждом слое структуры обеспечиваются процессом *фотолитографии*.

Фотолитография — процесс избирательного травления поверхностного слоя с использованием защитной *фотомаски*.

Таблица 7.3. **Формы приконтактных областей полупроводниковых резисторов и номограммы для определения коэффициента *k***

Топология приконтактных областей полупроводниковых резисторов	Номограммы для определения коэффициента *k*
	
	
	
	

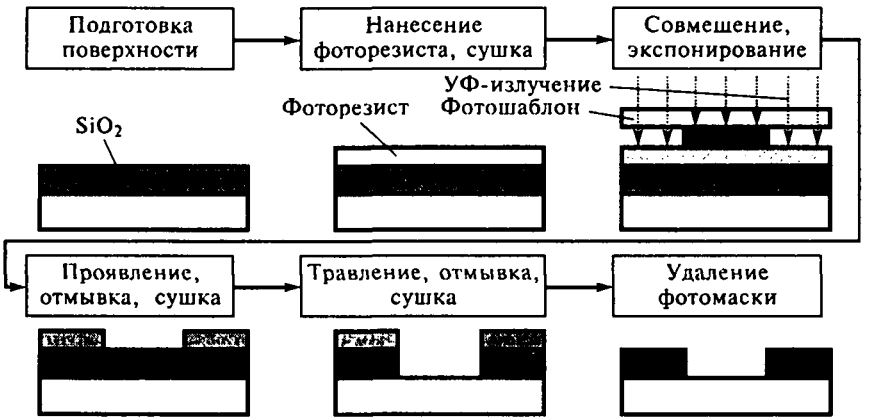


Рис. 7.15. Укрупненная схема процесса фотолитографии

На рис. 7.15 приведена укрупненная структурная схема процесса фотолитографии. Отдельные этапы на схеме включают несколько операций. Ниже в качестве примера приведено описание основных операций при избирательном травлении оксида кремния (SiO_2), которое используется многократно для создания окон под избирательное легирование, а также контактных окон.

Подготовка поверхности

Подготовка поверхности к нанесению фотослоя заключается в ее обработке парами органического растворителя для растворения жировых пленок, которые препятствуют последующему сцеплению фоторезиста с поверхностью. Отмывка сверхчистой (деионизованой) водой удаляет следы растворителя, а также микрочастицы, способные впоследствии образовать «проколы» в тонком (≈1 мкм) слое фоторезиста.

Нанесение фотослоя

При нанесении фотослоя используется раствор светочувствительного полимера в органическом растворителе (фоторезист). Для получения тонких слоев фоторезиста на поверхности пластины его вязкость должна быть очень мала, что достигается высоким содержанием растворителя (80...95 % по массе). В свою очередь, с уменьшением толщины фотослоя повышается разрешающая способность фотолитографического процесса. Однако при толщинах менее 0,5 мкм плотность дефектов («проколов») в фотослое резко возрастает, и защитные свойства фотомаски снижаются.

Нанесение фотослоя выполняют двумя способами: центрифугированием или распылением аэрозоля. В случае использования центрифуги дозированное количество фоторезиста подается в центр пластины, прижатой вакуумом к вращающейся платформе (центрифуге). Жидкий фоторезист растекается от центра к периферии, а центробежные силы равномерно распределяют его по поверхности пластины, сбрасывая излишки в специальный кожух. Толщина h нанесенной пленки зависит от скорости вращения платформы ω, вязкости фоторезиста ν и определяется соотношением

$$h = k\sqrt{\frac{\nu}{\omega}}, \tag{7.8}$$

где k — коэффициент, устанавливаемый экспериментально.

Скорость вращения центрифуги около 6000 об/мин, толщину фотослоя регулируют подбором соответствующей вязкости, т. е. содержанием растворителя.

Для центрифугирования характерны следующие недостатки:

1) трудность получения относительно толстых (в несколько микрометров) и равномерных пленок из-за плохой растекаемости вязкого фоторезиста;

2) напряженное состояние нанесенной пленки, что приводит на этапе проявления к релаксации участков фотомаски и изменению их размеров;

3) наличие краевого утолщения как следствие повышения вязкости в процессе выравнивания, что ухудшает контакт фотошаблона с фотослоем;

4) трудность организации одновременной обработки нескольких пластин.

При распылении аэрозоли фоторезист подается из форсунки на пластины, лежащие на столе, совершающем возвратно-поступательное движение. Необходимая толщина формируется постепенно. Отдельные мельчайшие частицы растекаются и, сливаясь, образуют сплошной слой. При следующем проходе частицы приходят на частично просохший слой, несколько растворяя его. Поэтому время обработки, которое зависит от вязкости, расхода и «факела» фоторезиста, от скорости движения стола и расстояния от форсунки до подложки, устанавливается экспериментально. При реверсировании стола крайние пластины получат бóльшую дозу фоторезиста, чем центральные. Во избежание утолщения слоя на крайних пластинах форсунке также сообщается возвратно-поступательное вертикальное движение (синхронно с движением стола). При торможении стола в конце хода форсунка поднимается вверх, и плотность потока частиц в плоскости пластин снижается.

Распыление аэрозоли лишено недостатков центрифугирования, допускает групповую обработку пластин, но предъявляет более жесткие требования к чистоте (отсутствие пыли) окружающей атмосферы. Нанесение фоторезиста и последующая сушка фотослоя являются очень ответственными

операциями, в значительной степени определяющими процент выхода годных микросхем.

Технические характеристики установки нанесения фоторезиста центрифугированием типа АФФ-2 следующие:

Диаметр обрабатываемых пластин, мм	60 и 75
Шаг расположения пластин на патроне, мм	9,5
Производительность, пластин/ч	500
Частота вращения центрифуги, об/мин:	
в режиме растекания фоторезиста	60...600
в режиме формирования пленки	600...6000
Время центрифугирования, с:	
в режиме растекания фоторезиста	1...10
в режиме формирования пленки	10...60
Температура в термокамере, °С	(80...180) ± 5
Время нагрева, мин	2...30
Давление рабочего газа в термокамере, Па	$(4...6) \cdot 10^5$
Давление в форвакуумной магистрали, Па	$\leqslant 10^4$
Расход сжатого воздуха, $м^3/ч$	$\leqslant 1$
Расход воды, л/ч	$\leqslant 100$
Максимальная потребляемая мощность, кВт	5
Размеры, мм	2800×1000×2500
Масса, кг	900

Технические характеристики полуавтомата нанесения фоторезиста распылением следующие:

Производительность, пластин/ч	до 500
Число одновременно обрабатываемых пластин	до 15
Скорость перемещения, мм/с:	
форсунки	100...150
стола	10 ... 25
Напряжение питания, В	380 (50 Гц)
Потребляемая мощность, кВт	2
Размеры, мм	1000×1800×1200
Масса, кг	430

Частицы пыли из окружающего воздуха могут проникать в наносимый слой и создавать микродефекты, поэтому нанесение фотослоя должно выполняться в условиях высокой обеспыленности в рабочих объемах (боксах, скафандрах) 1 класса с соблюдением следующей нормы: в 1 л воздуха должно содержаться не более четырех частиц размером не более 0,5 мкм.

При сушке нанесенного слоя в нем могут сохраниться пузырьки растворителя, а при выходе на поверхность слоя они могут образовать микротрещины. Поэтому сушка выполняется источниками инфракрасного излучения, для которого фоторезист является прозрачным, а, следовательно, поглощение излучения с выделением тепла происходит на границе пластина—фоторезист. Следовательно, сушка протекает от нижних слоев фоторезиста к верхним, обеспечивая свободное испарение растворителя. Во избежание преждевременной полимеризации (задубления) фоторезиста и потери им чувствительности температура сушки должна быть умеренной (примерно 100...120 °С).

Перечисленные виды дефектов фотослоя (пылевидные частицы, микропузырьки и микротрещины) сохраняются в фотомаске и наследуются оксидной маской, создавая в ней микроотверстия. При использовании оксидной маски для избирательного легирования примесь будет проникать через них, образуя легированные микрообласти и, как следствие, токи утечки и пробои в *p-n*-переходах. Если оксидная маска представляет собой слой контактных окон, то металл, проникая в микроотверстия, может привести к паразитным связям между областями и коротким замыканиям. Характеристики некоторых марок фоторезистов приведены в табл. 7.4.

Таблица 7.4. **Параметры некоторых типов фоторезистов**

Марка	Тип	Разрешающая способность, лин/мм, при толщине слоя 1 мкм	Цвет
ФП-383	Позитивный	400	Оранжевый
ФП-617П	Позитивный	500	Темно-коричневый
ФН-106	Негативный	200	Желтый
ФН-108	Негативный	400	Оранжевый

Совмещение и экспонирование

Под совмещением перед экспонированием понимается точная ориентация фотошаблона относительно пластины, при которой элементы очередного топологического слоя (на фотошаблоне) занимают положение относительно элементов предыдущего слоя (в пластине), предписанное разработчиком топологии. Например, фотошаблон, несущий рисунок эмиттерных областей, должен быть точно ориентирован относительно пластины, в которой уже сформированы базовые области. Процесс совмещения включает три этапа (рис. 7.16, *а*).

1. Предварительная ориентация по базовому срезу, обеспечивающая на границах модулей групповой пластины наивыгоднейшую кристаллогра-

фическую плоскость с точки зрения качества разделения пластины на отдельные кристаллы.

2. Предварительное грубое совмещение по границам крайних модулей, имеющее целью исключить разворот пластины и фотошаблона относительно вертикальной оси *z*.

3. Точное совмещение, исключающее смещение рисунков фотошаблона и пластины по осям *x* и *y*.

Для точного совмещения используют специальные знаки совмещения с контролируемым зазором, которые входят в состав топологических рисунков соответствующих слоев. Совмещение считается выполненным, если при введении одного знака внутрь другого по всему контуру просматривается зазор.

Номинальным зазором называется равномерный по всему контуру зазор, который образуется при номинальных (проектируемых) размерах знаков и их точном совмещения (центрировании). Из рис. 7.16, *б* следует, что

$$\delta_{ном} = \delta_{min} + \Delta_и + \frac{\Delta_ш + \Delta_п}{2}, \qquad (7.9)$$

где δ_{min} = 200/Г — предельное разрешение системы «глаз — микроскоп» (200 мкм — линейное разрешение нормального глаза; Г — кратность увеличения микроскопа); $\Delta_и$ — абсолютная предельная погрешность фиксации

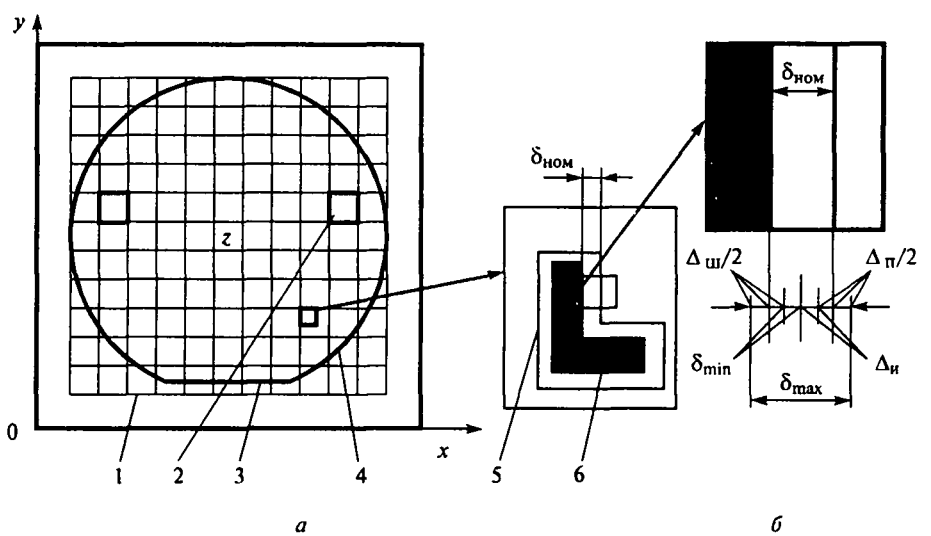


Рис. 7.16. Совмещение фотошаблона с пластиной:

а — общая схема совмещения; *б* — схема для расчета номинального зазора между знаками совмещения; *1* — групповой фотошаблон; *2* — модули для грубого совмещения; *3* — базовый срез на пластине для предварительной ориентации; *4* — групповая пластина; *5* — знак совмещения в модуле пластины; *6* — знак совмещения в модуле шаблона

изображения на установке совмещения и экспонирования; $\Delta_ш$ и $\Delta_п$ — абсолютная предельная погрешность размера знака соответственно на шаблоне и пластине ($\Delta_ш < \Delta_п$).

Таким образом, в зависимости от фактических значений случайных погрешностей реальный зазор может колебаться в пределах от δ_{max} до δ_{min}, а абсолютная предельная погрешность совмещения $\Delta_с$ для контролируемого модуля групповой пластины

$$\Delta_с = \delta_{max} - \delta_{min} = \Delta_п + \Delta_ш + \Delta_и. \qquad (7.10)$$

Для совокупности модулей в партии групповых пластин

$$\Delta_с = \Delta_п + \Delta_ш + \Delta_и + \Delta_t + \Delta_{доб}, \qquad (7.11)$$

где Δ_t — абсолютная предельная погрешность шага расположения модулей на групповом фотошаблоне; $\Delta_{доб}$ — дополнительное расширение зазора, которое может предусматриваться для снижения зрительного напряжения оператора.

Погрешность совмещения учитывается при расчете размеров областей каждого слоя. Обычно фотошаблон очередного слоя совмещается с предыдущим (по ходу ТП) слоем, уже сформированным на пластине. В частности, слой контактных окон совмещается с эмиттерным слоем, а слой металлизации — со слоем контактных окон. Поскольку контактные окна и металлические контакты формируются одновременно для всех областей структуры, погрешность совмещения накапливается и для эмиттерных областей составляет $4\Delta_с$, для базовых областей — $6\Delta_с$, для коллекторных — $8\Delta_с$. Поэтому совершенствование процессов литографии (уменьшение $\Delta_ш$ и $\Delta_п$) и применяемого оборудования ($\Delta_и$ и Δ_t) является важной задачей конструкторов и технологов. Влияние погрешности совмещения на размеры областей рассмотрено ниже на примере расчета размеров эмиттерной области транзистора.

После выполнения совмещения микроскоп отводится, а на его место подводится осветитель, жестко связанный с микроскопом на каретке (или поворотной турели). Оператор включает осветитель одновременно с реле времени, которое контролирует время экспонирования.

Проявление

Проявление скрытого изображения для негативных фоторезистов заключается в обработке фотослоя органическим растворителем. При этом участки, не подвергшиеся облучению, растворяются, а облученные участки, где при поглощении ультрафиолетового излучения УФ происходит разрыв

межатомных связей и перестройка структуры (фотополимеризация), сохраняются (см. рис. 7.15).

В позитивных фоторезистах на участках, подвергшихся облучению, происходит разрушение структуры (деструкция) с образованием кислоты. Для перевода ее в растворимые слои применяют раствор неорганического соединения со щелочными свойствами (KOH, NaOH и др.).

После отмывки от следов проявителя и сушки полученную фотомаску подвергают тепловому задублива́нию (120...180 °С в зависимости от марки фоторезиста), в результате чего окончательно формируются ее защитные свойства.

Травление

При травлении в жидких травителях используются водные растворы неорганических соединений (обычно кислот). Химический состав и концентрация травителя в растворе подбираются так, чтобы поверхностный слой растворялся активно, а нижележащий не растворялся. С травлением в жидких травителях связано не только явление подтравливания под фотомаску, но и разброс величины подтравливания в совокупности элементов одного слоя. К моменту окончания растворения слоя в окне фотомаски боковое травление оказывается примерно равным толщине слоя (рис. 7.17), однако момент окончания травления зависит от размеров вытравливаемого элемента (окна в маске). В процессе травления имеют место отвод продуктов химической реакции от поверхности в раствор и подвод из раствора свежего травителя. Оба процесса протекают благодаря взаимодиффузии, скорость которой и определяет скорость травления. В мелких элементах массообмен затруднен и скорость травления ниже, чем в крупных элементах. Поскольку технологическое время травления устанавливают по самому мелкому элементу, более крупные элементы «перетравливаются», т. е. имеют бóльшие погрешности размера.

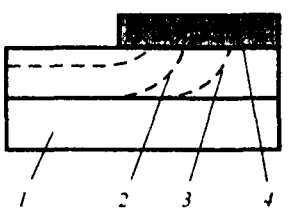


Рис. 7.17. Боковое подтравливание под фотомаску:

1 — пластина; *2* — фронт травления при нормальном режиме; *3* — фронт травления при «перетравливании»; *4* — фотомаска

Для повышения точности травления, т. е. уменьшения разброса размеров элементов из-за растравления, необходимо динамическое воздействие травителя на обрабатываемую поверхность. На рис. 7.18 приведена схема установки на основе центрифуги, снабженной тремя форсунками для последовательного травления, отмывки (деионизованной водой) и сушки (подогретым воздухом). Форсунка для травителя обеспечивает ускоренную подачу свежего травителя к поверхности, вытесняя

продукты реакции, а центробежные силы ускоряют отвод отработанного травителя. Ниже приведены типы применяемых при производстве ИМС травителей:

Ag	г.к. H_2SO_4, HNO_3
Al	рз. щелочи, г. H_3PO_4
Au	«царская водка» (к $HCl:HNO_3$=3:1)
Cr	HCl, H_2SO_4, г. HNO_3
Cu	г.к. H_2SO_4, HNO_3
Mo	г.к. H_2SO_4, г. HNO_3, «царская водка»
Ni	рз. кислоты
Pd	HNO_3, г.к. H_2SO_4, «царская водка»
Pt	«царская водка»
Si	HNO_3+HF
SiO_2	рз. HF
Si_3N_4	г. H_3PO_4, к. HF
Ta	HF
Ti	щелочи, HF, рз. кислоты
V	HF, HNO_3, «царская водка», г.к. H_2SO_4
W	«царская водка», HNO_3+HF

Здесь к. — концентрированная; рз. — разбавленная; г. — горячая.

Существенное повышение точности травления достигается при вакуум-плазменных («сухих») методах травления, при которых разрушение слоя происходит механически за счет бомбардировки потоком заряженных частиц (ионов инертного газа). Для этого в вакуумной камере при давлении газа 1...10 Па зажигается разряд и обрабатываемая пластина, в данном случае являющаяся катодом, подвергается обработке ионами с энергией до 1 кэВ. Структура полимерной фотомаски и ее толщина сохраняют ее защитные свойства до окончания обработки слоя. Поскольку движение ионов инертного газа (обычно аргона) происходит по нормали к поверхности пластины, вытравленные участки точно соответствуют размерам окон фотомаски, т. е. эффект подтравливания отсутствует.

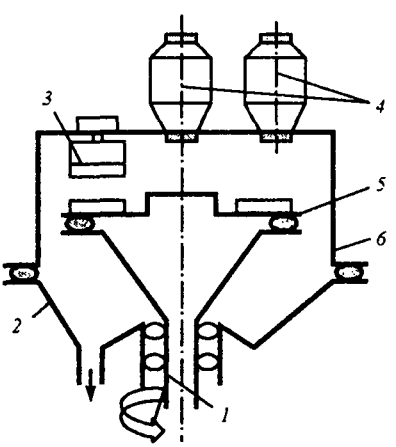


Рис. 7.18. Схема установки травления, отмывки и сушки:

1 — полый ротор; *2* — днище камеры с отверстием; *3* — форсунка сушки; *4* — форсунки травления и отмывки; *5* — платформа с пластинами; *6* — съемная крышка

7.10. Расчет топологических размеров областей транзистора

При проектировании элементов и областей МС конструктор обязан обеспечить минимально возможные размеры. Если нет ограничений по мощности, то минимальные размеры областей биполярного транзистора ограничены возможностями технологии: a_{min} — минимальный надежно воспроизводимый размер (так называемая конструкторская или топологическая норма); $\pm\Delta_п$ — абсолютные предельные отклонения размеров топологических элементов на пластине; $\pm\Delta_с$ — абсолютные предельные значения погрешности совмещения двух смежных слоев на пластине.

Рассмотрим расчет размеров эмиттерной области, с которой начинается топологическое проектирование транзистора (рис. 7.19).

Сначала определяется минимально возможный номинальный размер металлического вывода над контактным окном $l_{эп1}$ (рис. 7.19, *а*). При этом должно быть обеспечено гарантированное заполнение металлом контактного окна и с учетом этого требования рассматривается наиболее неблагоприятное сочетание погрешностей (расчет на наихудший случай). Размер контактного окна можно принять равным топологической норме ($l_{эк1} \geqslant a_{min}$). Наихудший (критический) случай возникает, если размер $l_{эк1}$ оказался выполненным по максимуму ($+\Delta_п$), а размер $l_{эп1}$ — по минимуму ($-\Delta_п$). С учетом возможного максимального смещения площадки в ту или другую сторону на $\Delta_с$ согласно расчетной схеме

$$l_{эп1} = l_{эк1} + 2\Delta_п + 2\Delta_с. \qquad (7.12)$$

Далее определяется размер $l_{э1}$ собственно эмиттерной области (рис. 7.19, *б*) из условия, что металлическая площадка не должна выступать за пределы области. Наихудший случай, когда размер $l_{э1}$ выполнен по минимуму, а размер $l_{эп1}$ — по максимуму. Поскольку при изготовлении рисунок контактных окон совмещался с рисунком эмиттерного слоя, а рисунок ме-

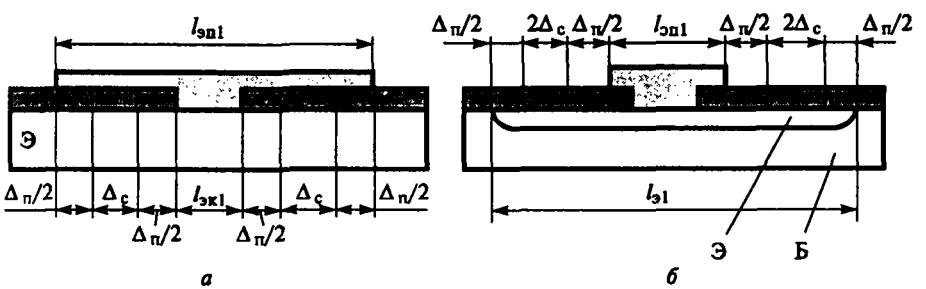


Рис. 7.19. К топологическому расчету эмиттерной области

таллизации — с рисунком контактных окон, максимальная погрешность положения металлической площадки относительно эмиттерной области составит $2\Delta_c$ в ту или другую сторону. Согласно расчетной схеме

$$l_{э1} = l_{эп1} + 2\Delta_п + 4\Delta_c. \qquad (7.13)$$

Для маломощных транзисторов эмиттерная область проектируется квадратной ($l_{э2} = l_{э1}$). С повышением мощности периметр эмиттера увеличивают за счет увеличения размера $l_{э2}$ (с учетом эффекта оттеснения тока в эмиттере к краям области). Аналогичные правила заложены в расчет размеров базовых и коллекторных областей, причем погрешность совмещения этих областей с металлическими контактами продолжает накапливаться, и ее максимальное значение составляет $6\Delta_c$ для базовых областей и $8\Delta_c$ — для коллекторных.

7.11. Осаждение тонких пленок в вакууме

Проводники на поверхности кристалла полупроводниковой ИМС, а также пассивные элементы гибридно-пленочных МС создаются на основе тонких пленок толщиной 0,1...2 мкм. Высокая точность по толщине и химическая чистота для тонких пленок могут быть достигнуты только при выращивании слоя из атомарного (молекулярного) потока. Такие условия можно создать в вакууме либо при нагреве, испарении и конденсации материала — термическое вакуумное напыление (ТВН), либо при бомбардировке твердого образца материала (мишени) ионами инертного газа, распыления его в атомарный (молекулярный) поток и конденсации на поверхности изделия — распыление ионной бомбардировкой (РИБ).

Термическое вакуумное напыление

Упрощенная схема рабочей камеры термического вакуумного напыления представлена на рис. 7.20.

Процесс проведения операции вакуумного напыления состоит из следующих действий. В верхнем положении колпака с подложкодержателя снимают обработанные подложки и устанавливают новые. Колпак опускают и включают систему вакуумных насосов (вначале для предварительного разрежения, затем высоковакуумный). Для ускорения десорбции воздуха с внутренних поверхностей и сокращения времени откачки в трубопровод подают горячую проточную воду. По достижении давления внутри камеры порядка 10^{-4} Па (контроль по манометру) включают нагреватели испарителя

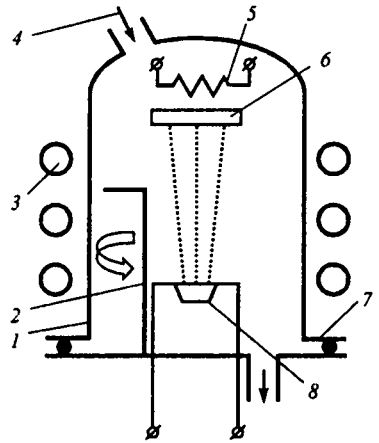


Рис. 7.20. Упрощенная схема рабочей камеры термического вакуумного напыления:

1 — вакуумный колпак из нержавеющей стали; *2* — заслонка; *3* — трубопровод для водяного нагрева или охлаждения колпака; *4* — игольчатый натекатель для подачи атмосферного воздуха в камеру; *5* — нагреватель подложки; *6* — подложкодержатель с подложкой, на которой может быть размещен трафарет; *7* — герметизирующая прокладка из вакуумной резины; *8* — испаритель с размещенным в нем веществом и нагревателем (резистивным или электронно-лучевым)

и подложек. При достижении рабочих температур (контроль с помощью термопар) заслонку отводят в сторону и пары вещества достигают подложки, где происходит их конденсация и рост пленки. Система автоматического контроля за ростом пленки фиксирует либо толщину пленки (для диэлектрика пленочных конденсаторов), либо поверхностное сопротивление (для резисторов), либо время напыления (проводники и контакты, защитные покрытия). Вырабатываемый при этом сигнал об окончании напыления после усиления воздействует на соленоид заслонки, перекрывая ею поток пара. Далее отключают нагреватели испарителя и подложек, выключают систему откачки, а в трубопровод подают холодную проточную воду. После остывания подколпачных устройств через натекатель плавно впускают атмосферный воздух. Выравнивание давлений внутри и вне колпака дает возможность поднять его и начать следующий цикл обработки.

Процесс термического вакуумного напыления характеризуется температурой на испарителе $t_{ис}$, давлением воздуха в рабочей камере P_0, температурой нагрева подложек $t_п$. Температура нагрева испарителя ($t_{ис}$) должна обеспечивать достаточно высокую интенсивность испарения, чтобы время напыления пленки не превышало 1...2 мин. В то же время чрезмерно высокая интенсивность приводит к образованию мелкозернистой неустойчивой структуры в пленке, о чем будет сказано ниже.

Интенсивность испарения удобно характеризовать упругостью пара (давлением пара в состоянии насыщения) P_s. Упругость пара для данного вещества зависит только от температуры:

$$\lg P_s = A - \frac{B}{T}, \qquad (7.14)$$

где A и B — коэффициенты, характеризующие род материала (табл. 7.5); T — абсолютная температура вещества, К.

Оптимальной интенсивностью испарения принято считать интенсивность, при которой упругость пара составляет примерно 1,3 Па. Соответствующая этой упругости температура испарения называется *условной* и может быть вычислена по формуле (7.14). Так, для алюминия она равна 1150 °С, для хрома — 1205 °С, для меди — 1273 °С, для золота — 1465 °С и т. д.

Таблица 7.5. **Температуры плавления и испарения некоторых элементов**

Элемент	$t_{пл}$, °С	$t_{усл}$, °С	Коэффициенты		Рекомендуемые материалы испарителя	
			A	*B*	проволоки, ленты	тигля
Ag	961	1047	(11,40)	(14850)	Mo, Ta	Mo, C
			10,78	14090		
Al	660	1150	11,11	15630	W	C, BN, TiB_2—BN
Au	1063	1465	10,77	18250	W, Mo	Mo, C
Cr	1800	1205	(12,00)	(17560)	W, Ta	—
Cu	1083	1273	10,84	16580	W, Mo, Ta	Mo, C, Al_2O_3
Mo*	2622	2533	(10,92)	(30310)	—	—
Ni	1455	1510	(12,40)	(21840)	W	Окислы
			11,67	20600		
Pd	1555	1566	10,58	19230	W	Al_2O_3
Pt	1774	2090	11,75	27500	W	ThO_2, ZrO_2
Ta*	2996	3070	12,12	40210	—	—
Ti	1725	1546	(10,37)	(18640)	W, Ta	C, ThO_2
			11,10	20110		
W*	3382	3309	(11,36)	(40260)		

Примечание. Значения в скобках приведены для твердого состояния.

* Рекомендуется испарение электронно-лучевым нагревом или распыление ионной бомбардировкой.

Низкое давление воздуха P_0 в рабочей камере необходимо для обеспечения свободной диффузии атомов вещества испарителя в объем рабочей камеры, прямолинейного движения атомов вещества без столкновения с молекулами остаточного воздуха и бесполезного рассеивания материала в объеме камеры, исключения химического взаимодействия напыляемого вещества с молекулами воздуха.

Перечисленные условия обеспечиваются при остаточном давлении $P_0 \leqslant 10^{-4}$ Па с помощью форвакуумного механического и высоковакуумного диффузионного насосов, включенных последовательно.

Температура подложки в процессе осаждения оказывает существенное влияние на структуру пленки, а, следовательно, и на стабильность ее электрофизических свойств в процессе эксплуатации.

Атомы вещества поступают на подложку с энергией $кT$ ($к$ = 8,63× ×10^{-5} эВ/К — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура) и скоростью порядка 1000 м/с. Часть энергии при этом передается поверхностным атомам подложки, а остаточная энергия позволяет им некоторое время мигрировать в поверхностном потенциальном поле. Доля остаточной энергии тем выше, чем выше температура подложки. В процессе миграции атом может либо покинуть подложку (на потенциальном бугре поля), либо частично погасить энергию, вступив во взаимодействие с другим мигрирующим атомом. Полностью потерять способность мигрировать и закрепиться на нагретой подложке (конденсироваться) может лишь многоатомная группа, которая становится одним из центров кристаллизации. При невысокой плотности потока атомов, т. е. умеренной температуре на испарителе, число центров кристаллизации на единицу площади невелико и к моменту образования сплошной пленки вокруг них успевают вырасти крупные кристаллы.

Снижение температуры подложки и повышение плотности потока приводит к более раннему образованию центров кристаллизации, увеличению их числа на единицу площади и формированию мелкокристаллической структуры. В процессе эксплуатации ЭА, когда она подвергается периодическим циклам нагрева и медленного охлаждения, мелкокристаллическая структура постепенно рекристаллизуется в крупнокристаллическую. Электрофизические свойства при этом необратимо изменяются, происходит «старение» пленки. В резистивных пленках, например, со временем наблюдается уменьшение удельного сопротивления. Итак, для формирования тонких пленок, стабильных в процессе эксплуатации, необходимо подложку нагревать и не форсировать процесс напыления за счет повышения температуры на испарителе.

В производстве тонкопленочных структур, как и в случае полупроводниковых, используют групповые подложки. Такие подложки имеют прямоугольную форму размером 60×48 мм или 120×96 мм, изготовлены из изолирующего материала (ситалл, поликор, стекло) и рассчитаны на одновременное изготовление до нескольких десятков идентичных модулей. Таким образом, свойства напыленной пленки должны быть одинаковы на всей площади групповой подложки.

В первом приближении поток атомов от испарителя к подложке представляет собой расходящийся пучок и поэтому плотность потока в плоскости подложки не равномерна: в центре подложки она максимальна и убывает от центра к периферии. Это означает, что при напылении пленки на неподвижную подложку в центральной области подложки образуется более

толстая пленка, нежели на краях подложки. Например, резисторы, сформированные в центральных модулях, будут иметь заниженные сопротивления по сравнению с аналогичными резисторами периферийных модулей.

С учетом вышеизложенного производственные установки термовакуумного напыления (рис. 7.21) снабжены вращающимися устройствами (дисками, барабанами), несущими несколько подложек (6, 8 или 12). Подложки последовательно и многократно проходят над неподвижным испарителем, постепенно набирая необходимую толщину пленки. В результате центральный «холм», который мог бы образоваться на неподвижной подложке, размывается в «хребет», вытянутый в направлении движения подложки. Для выравнивания толщины пленки в поперечном направлении применяют корректирующую диафрагму, устанавливаемую между испарителем и подложкой в непосредственной близости от нее. Профиль диафрагмы рассчитывается на основании исследования рельефов пленки, получаемых при напылении на неподвижную и движущуюся подложки. В результате различия времени облучения центральной и периферийной зон подложки равномерность толщины пленки на всей площади групповой подложки повышается и составляет ±2 % (для подложек 60х48 мм). Технические характеристики установки типа УВН-71П-3 следующие:

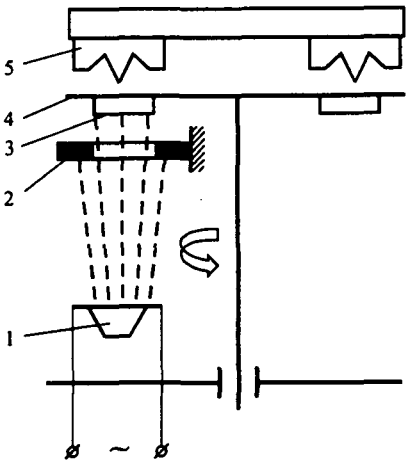


Рис. 7.21. Схема установки термовакуумного напыления карусельного типа:

1 — испаритель; *2* — корректирующая диафрагма; *3* — подложкодержатели с подложкой; *4* — диск карусели; *5* — нагреватель подложки

Предельный вакуум в рабочей камере, Па ..... $6{,}5 \cdot 10^{-4}$
Размеры рабочей камеры, мм:
диаметр 500
высота 640
Максимальная температура нагрева рабочей камеры, °С 90
Количество резистивных испарителей, шт. 3
Питание испарителей:
мощность, кВт 2
максимальный ток, А 500
Скорость автоматического вращения карусели, об/мин .....50...100
Количество подложек, обрабатываемых за один цикл, шт.... 11
Температура нагрева подложек, °С ..... до 400 ± 1,5

Расход воды, л/ч:	
холодной	600
горячей	200
Расход сжатого воздуха, л/ч	30
Максимальная потребляемая мощность, кВт	12
Габаритные размеры установки, мм	1300×850×1870
Общая масса, кг	1200

Распыление ионной бомбардировкой

Термическое вакуумное напыление имеет ряд недостатков и ограничений:

напыление пленок из тугоплавких материалов (W, Mo, SiO_2, Al_2O_3 и др.) требует высоких температур на испарителе, при которых неизбежно «загрязнение» потока материалом испарителя;

при напылении сплавов различие в скорости испарения отдельных компонентов приводит к изменению состава пленки по сравнению с исходным составом материала, помещенного в испаритель;

инерционность процесса, требующая введения в рабочую камеру заслонки с электромагнитным приводом;

неравномерность толщины пленки, что требует применения устройств перемещения подложек и корректирующих диафрагм.

Первые три недостатка обусловлены необходимостью высокотемпературного нагрева вещества, а последний — высоким вакуумом в рабочей камере.

Процесс распыления ионной бомбардировкой является «холодным» процессом, так как атомарный поток вещества на подложку создается путем бомбардировки поверхности твердого образца (мишени) ионами инертного газа и возбуждения поверхности атомов до энергии, превышающей энергию связи с соседними атомами. Необходимый для этого поток ионов создается в электрическом газовом разряде, для чего давление газа в рабочей камере должно составлять 0,1... 10 Па, т. е. на несколько порядков более высокое, чем в камере установки термовакуумного напыления. Это приводит к рассеиванию потока атомов с мишени и повышению равномерности толщины осаждаемой пленки до ±1 %, причем без применения дополнительных устройств.

Катодное распыление — одна из разновидностей распыления ионной бомбардировкой. Оно постепенно вытесняется более совершенными процессами высокочастотного и магнетронного распыления. Будучи относительно простым, оно представляет собой наиболее удобную форму для изучения процессов этого вида распыления вообще. На рис. 7.22 представлена схема рабочей камеры установки катодного распыления.

Из рис. 7.22 также видно, что питание осуществляется постоянным напряжением, а нижний электрод с подложками заземлен и находится под

более высоким потенциалом, чем катод-мишень. Переменная нагрузка $R_н$ служит для регулирования тока разряда.

На рис. 7.23 представлена упрощенная структура разряда и распределение потенциала вдоль разряда, а также типы частиц, участвующих в процессе.

Разряд разделен на две зоны: темное катодное пространство и светящаяся область. На темное катодное пространство приходится основное падение напряжения. Здесь заряженные частицы разгоняются до энергии, достаточной, чтобы ионы, бомбардируя катод—мишень, освобождали поверхностные атомы и электроны (если мишень из проводящего материала), а электроны — на границе темного катодного пространства ионизировали молекулы аргона. При ионизации образуется ион аргона, который, ускоряясь, стремится к мишени, и электрон, который, как и «отработанный» ионизирующий электрон, дрейфует к аноду в слабом поле светящейся области. Освобожденный с поверхности мишени атом вещества, преодолевая столкновения с молекулами и ионами аргона, достигает поверхности подложки. При этом непрерывный поток ионов бомбардирует мишень, и непрерывный поток атомов вещества движется к подложке.

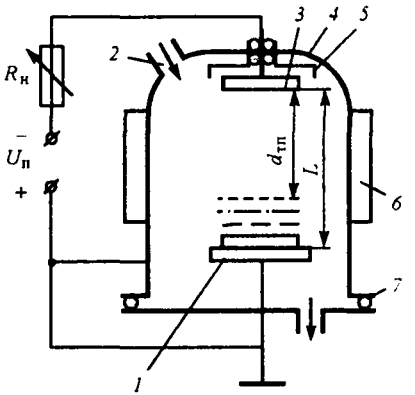


Рис. 7.22. Упрощенная схема рабочей камеры установки катодного распыления:

1 — анод с размещенными на нем подложками; *2* — игольчатый натекатель, обеспечивающий непрерывную подачу аргона; *3* — катод — мишень из материала, подлежащего распылению и осаждению; *4* — вакуумный колпак из нержавеющей стали; *5* — экран, охватывающий катод с небольшим зазором и предотвращающий паразитные разряды на стенки камеры; *6* — постоянный электромагнит, удерживающий электроны в пределах разрядного столба; *7* — герметизирующая прокладка

К недостаткам катодного распыления относятся:

возможность распыления только проводящих материалов, способных эмиттировать в разряд электроны, ионизирующие молекулы аргона и поддерживающие горение разряда;

малая скорость роста пленки (единицы нм/с) из-за значительного рассеивания распыляемых атомов материала в объеме рабочей камеры.

Высокочастотное распыление позволяет распылять любые материалы. При замене постоянного напряжения на переменное диэлектрическая мишень становится конденсатором и подвергается бомбардировке ионами в отрицательный полупериод питающего напряжения. Иначе говоря, распыление мишени происходит не непрерывно, как при катодном распылении, а дискретно с частотой питающего напряжения (обычно 13,56 Мгц).

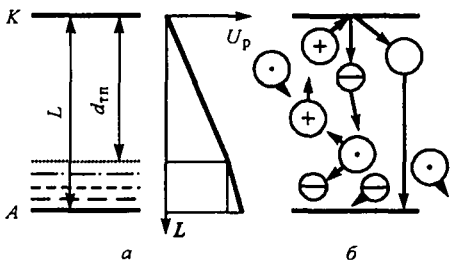


Рис. 7.23. Распределение потенциала (*а*) и виды частиц (*б*) в межэлектродном пространстве:

⊙ — молекула аргона; ⊕ — ион аргона; ⊖ — электрон; ○ — атом распыляемого вещества

При высокой частоте и согласованном с ним расстоянием от мишени до подложек электроны, находящиеся в срединной части высокочастотного разряда, не успевают достигать электродов за время полупериода, они остаются в разряде, совершая колебательные движения и интенсивно ионизируя рабочий газ, что позволяет снизить давление рабочего газа без снижения разрядного тока, так как степень ионизации заметно повышается (второй недостаток катодного распыления). Характерные режимы высокочастотного распыления: $P = 0{,}5...5$ Па; $J_р = 1...2$ А; $U_р = 1...2$ кВ.

Магнетронное распыление (в частности ВЧ-магнетронное) обеспечивает существенное снижение давления рабочего газа и повышение за счет этого скорости осаждения пленки. Для этого на разрядный столб накладывается постоянное магнитное поле, вектор которого перпендикулярен вектору электрического поля. В результате движение электронов происходит по сложным (близким к циклоидам) траекториям, степень ионизации рабочего газа существенно повышается, что дает возможность снизить давление газа, не снижая (и даже повышая) разрядный ток. В результате повышается скорость роста пленки до нескольких десятков нм/с, что сравнимо со скоростями в процессах термического вакуумного напыления. Характерные режимы ВЧ-магнетронного распыления: $P = 0{,}1...0{,}5$ Па; $J_р = 2...4$ А; $U_р = 0{,}7...1$ кВ.

7.12. Тонкопленочные резисторы

Тонкопленочные резисторы являются элементами гибридных тонкопленочных МС, а также согласующими элементами в микросборках, где они присутствуют в виде резистивных матриц (резистивных «сборок») на отдельной миниатюрной подложке, представляющей собой компонент микросборки. В обоих случаях резисторы изготавливаются на основе общей резистивной пленки одновременно, т. е. по интегральной технологии.

Для осаждения тонких резистивных пленок используют стандартные резистивные сплавы в виде порошков (для термовакуумного напыления) или дисков-мишеней (для распыления ионной бомбардировкой). Сплавы

представляют собой силициды хрома, никеля, железа и двойные или тройные системы на их основе. Содержание кремния в них от 15 до 95 % обеспечивает широкий диапазон удельных сопротивлений. Конкретные марки резистивных сплавов характеризуются рекомендуемыми значениями удельного поверхностного сопротивления $R_{сл}$, Ом, допустимой удельной мощностью рассеивания P_0, Вт/см^2, температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) α, К$^{-1}$ и коэффициентом старения $\gamma_{ст}$. Параметры некоторых сплавов для получения тонкопленочных резисторов приведены в табл. 7.6.

Таблица 7.6. **Электрофизические свойства резистивных металлосилицидных сплавов**

Марка сплава	$R_{сл}$, Ом	$\alpha \cdot 10^{-4}$, К$^{-1}$	P_0, Вт/см^2	Необратимые изменения за 1000 ч при 85 °С при нагрузке 1 Вт/см^2, не более
РС5006	3...20	0,5	5	0,02
РС5402	5...100	0,5	2	0,01
РС5406К	10...500	0,5	2	0,01
РС5406Н	50...500	0,3	2	0,01
РС3710	50...3000	1	5	0,005
РС4800	100...1000	2	5	0,01
РС1714	300...500	2	5	0,01
РС4206	1000	0,5	2	0,005
РС4400	1000...5000	3	10	—
РС1004	3000...50000	15	5	0,02
РС2310	10000...80000	12	5	0,02
РС2005	80000...500000	12	5	0,02

С учетом выводов резисторов из электропроводящей тонкой пленки структуру резистора можно рассматривать как двухслойную. При этом возможны три технологических способа формирования резисторов (рис. 7.24):

фотолитографический — напыление сплошной резистивной пленки, напыление сплошной проводящей пленки, фотолитография по проводящей пленке, фотолитография по резистивной пленке (рис. 7.24, *б*);

трафаретный — напыление резистивных элементов через трафарет, напыление проводящих элементов через трафарет (рис. 7.24, *а*);

комбинированный — напыление сплошной резистивной пленки, напыление проводящих элементов через трафарет, фотолитография по резистивной пленке.

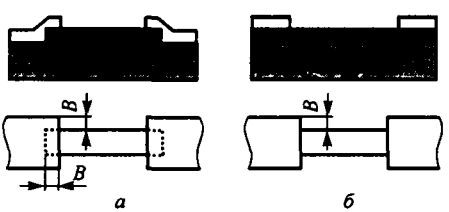


Рис. 7.24. Структура и топология тонкопленочных резисторов

Трафаретный способ более производителен, но заметно уступает фотолитографическому по разрешающей способности (a_{min}) и точности ($\Delta_п$):

Параметр, мм	a_{min}	$\pm\Delta_п$	B	$(l/a)_{max}$
Фотолитографический способ	0,1	±0,005	0,1	Не ограничено
Трафаретный способ	0,3	±0,02	0,2	10

Уширение проводящего вывода на величину B с каждой стороны призвано не допустить изменение сопротивления резистора из-за погрешности совмещения резистивного и проводящего рисунков.

Для приближения выводов высокоомного резистора друг к другу и сокращения длины связей в МС конструктор может отступить от прямолинейной конфигурации резистора и ввести в нее два или более изгибов под прямым углом (рис. 7.25). При этом следует учитывать два обстоятельства.

1. При любой конфигурации резистора входной и выходной токи должны быть ориентированы в одну сторону. В противном случае предусмотренные уширения выводов не будут выполнять своих функций и погрешность совмещения проводящего и резистивного слоев вызовут дополнительную погрешность сопротивления. Следует отметить, что для полупроводниковых резисторов указанное правило не имеет смысла.

2. Участок изгиба имеет пониженное сопротивление в сравнении с линейным участком той же длины (по средней линии), что требует корректировки длины резистора в сторону ее увеличения. Так, Г-образный участок,

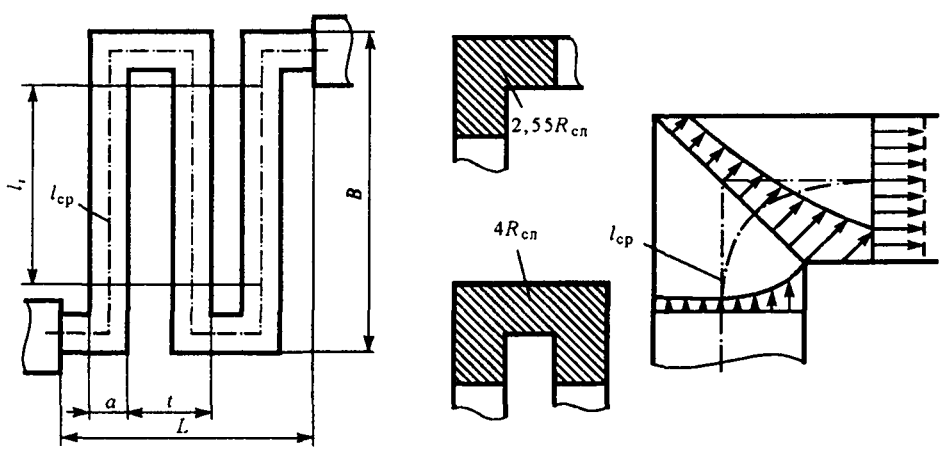


Рис. 7.25. Конфигурация резистора типа «меандр»:
а — параметры меандра; *б* — участки изгиба

включающий три квадрата (см. рис. 7.25, *б*), вместо $3R_{сл}$ имеет сопротивление $2{,}55R_{сл}$, а П-образный, включающий пять квадратов, вместо $5R_{сл}$ имеет сопротивление $4R_{сл}$ ($R_{сл}$ — удельное поверхностное сопротивление). Это явление объясняется тем, что плотность тока на изгибах оказывается более высокой у внутреннего контура резистора, в результате чего электрическая длина резистора (по средней плотности тока) уменьшается.

Наибслее сложную конфигурацию имеет меандр, который используется для уменьшения габаритов резистора и упрощения последующей коммутации, хотя занимаемая резистором площадь при этом возрастает. Как следует из рис. 7.25, *а*, геометрическими параметрами резистора-меандра являются: ширина резистивной полоски a, шаг звеньев меандра t (под звеном подразумевается Г-образная часть меандра), ширина резистора B и длина L. Поскольку $L \cong nt$, где n — число звеньев, $B \cong l/n$, где l — длина исходного прямолинейного резистора,

$$n \cong \sqrt{\frac{l \cdot L}{t \cdot B}}. \qquad (7.15)$$

Для получения однозначного решения обычно принимают $t = 2a$ и $L = B$, т. е. меандр вписывают в квадрат, что обеспечивает минимальные габаритные размеры. Тогда

$$n = \sqrt{\frac{l}{2a}}, \qquad (7.16)$$

где l и a — длина и ширина предварительно спроектированного резистора линейной конфигурации.

Далее сопротивление резистора-меандра представляют в виде суммы сопротивлений П-образных, Г-образных и линейных участков, из которой затем определяют необходимую длину линейных участков l_i. Например, для резистора, представленного на рис. 7.25,

$$R = 2 \cdot 4R_{сл} + 2 \cdot 2{,}55R_{сл} + 3 \cdot R_{сл} \cdot \frac{l_i}{a},$$

где R — заданное сопротивление резистора.

7.13. Основы толстопленочной технологии

Толстые пленки толщиной в несколько десятков микрометров применяют для изготовления пассивных элементов (резисторов, конденсаторов, проводников и контактов) в гибридных толстопленочных МС, а также про-

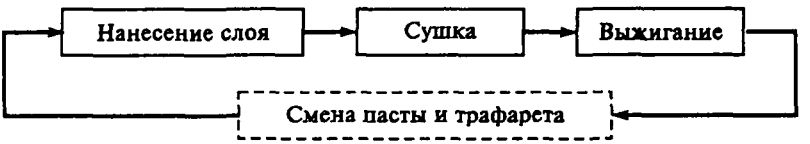


Рис. 7.26. Структурная схема цикла толстопленочной технологии

водников и изолирующих слоев в некоторых типах многоуровневых коммутационных микроплат микросборок.

В основе толстопленочной технологии лежит использование дешевых и высокопроизводительных процессов, требующих небольших единовременных затрат на подготовку производства, благодаря чему она оказывается экономически целесообразной и в условиях мелкосерийного производства. Высокая надежность толстопленочных элементов обусловлена прочным (свыше 5 МПа) сцеплением с керамической подложкой, которое достигается процессом вжигания пасты в поверхностный слой керамики.

В целом толстопленочная технология состоит из ряда последовательных идентичных циклов, структурная схема которых приведена на рис. 7.26. При формировании каждого слоя (резистивного, проводящего, диэлектрического и т. п.) используют соответствующие пасты, которые через сетчатый трафарет наносят на подложку, подвергают сушке и вжиганию. По завершении формирования всех слоев все резисторы и конденсаторы проходят подгонку (обычно лазерную) до заданной точности.

Толстопленочные пасты

В готовом (вожженном) состоянии толстопленочный элемент состоит из мелких функциональных частиц, находящихся в массовом контакте друг с другом (рис. 7.27) и «склеенных» стеклом с невысокой (400...500 °С) температурой плавления. Для проводящих элементов используют порошки серебра, палладия и других металлов с высокой электропроводностью. Для резистивных — смесь порошков проводящих частиц и частиц окислов металлов в различных пропорциях, что позволяет варьировать удельное поверхностное сопротивление в широких пределах. Диэлектрические слои конденсаторов содержат порошки сегнетоэлектриков, которые, обладая большим значением

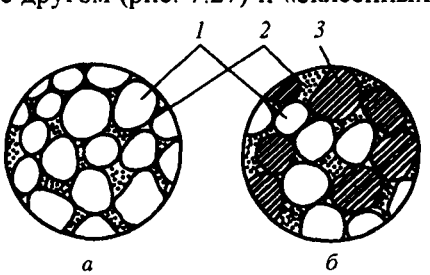


Рис. 7.27. Структура толстопленочных элементов:

1 — частицы металла; *2* — конструкционная связка; *3* — частицы окисла металла

относительной диэлектрической проницаемости ε, обеспечивают большие значения удельной электрической емкости C_0, Ф/см^2. Изолирующие слои, наоборот, создаются на основе порошков стекол с малыми ε и C_0. Функциональные частицы в процессе вжигания должны сохранять твердое состояние и массовый контакт, т. е. иметь температуру плавления более 900 °С.

Для приготовления паст в смесь порошков функциональных частиц и низкотемпературного стекла добавляют технологическую связку, обычно органические масла. В процессе вжигания нанесенных элементов она должна разлагаться и полностью удаляться из слоя.

Особую группу паст представляют лудящие пасты. Они состоят из частиц припоя, смоченных раствором флюса (например, канифоль в спирте). После нанесения пасты через сетчатый трафарет на толстопленочные монтажные площадки и сушки покрытие подвергается оплавлению (~230 °С).

Марки и свойства различных сплавов и паст приведены в табл. 7.8—7.11.

Таблица 7.8. **Характеристики диэлектрических паст**

Марка пасты	Толщина, мкм	Удельная емкость, пФ/см^2	Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 1,5 МГц	Применение
ПК-1000-30	40...60	3700	0,0035	Диэлектрик конденсаторов, изоляция пересекающихся проводников
ПК-12	40...60	10000	0,0035	Диэлектрик конденсаторов
ПД-1	60...70	160	0,002	Межслойная изоляция в двухуровневых соединениях
ПД-2	50...60	220	0,003	Межслойная изоляция в многоуровневых соединениях
ПД-3	30...50	—	0,002	Верхний защитный слой при использовании пасты ПД-1
ПД-4	30...50	—	0,003	Верхний защитный слой при использовании пасты ПД-2

Примечания. 1. Температурный коэффициент емкости для различных марок $\pm 3{,}5 \cdot 10^{-4}$ К$^{-1}$. 2. Напряжение пробоя равно 150 В для конденсаторов и 500 В для межслойной изоляции.

Таблица 7.9. **Характеристики проводящих паст**

Характеристика	Марка пасты					
	4350	4350Т	4351	4005	4205	4320
Растекаемость на сторону, мкм, не более	50	25	25	50	25	50
Температура вжигания на воздухе, °С	820±10	820±10	870±5	820±10	870±3	855±5
$R_{сл}$, Ом, не более	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,02
Адгезия к керамике, МПа, не менее	5	5	10	5	8	10

Примечания. 1. Толщина пленок после вжигания 17±4 мкм. 2. Пленки облуживаются припоями ПОС-61 и ПСрОС-3-58.

Таблица 7.10. **Характеристики лудящих паст**

Марка пасты	Припой	Флюс	Растворитель остатков связки
ПЛ-111	ПОС-61	Активный среднекоррозионный	Вода
ПЛ-112	ПОС-61	Некоррозионный	Хлористый метилен
ПЛ-312	ПСрОС-3-58	Некоррозионный	Хлористый метилен
ПЛ-113	ПОС-61	Слабокоррозионный	Спирто-бензиновая смесь (1:1). Водные моющие растворы

Примечания. 1. Содержание частиц припоя с размером менее 40 мкм — 20 %, с размером 40...80 мкм — 80 %. 2. Нанесение — трафаретной печатью или дозатором. 3. Оплавление при температуре 225±5 °С.

Таблица 7.11. **Характеристики резистивных паст**

Характеристика	Марка пасты								
	ПР-5	ПР-100	ПР-500	ПР-1К	ПР-3К	ПР-6К	ПР-20К	ПР-50К	ПР-100К
$R_{сл}$, Ом	5	100	500	1000	3000	6000	20000	50000	100000

Примечания. 1. Толщина пленок после вжигания 15...20 мкм. 2. Температурный коэффициент сопротивления в диапазоне от –60 до +125 °С для различных марок $\pm 8 \cdot 10^{-4}$ $К^{-1}$. 3. Максимальная удельная мощность рассеивания для различных марок 3...8 $Вт/см^2$.

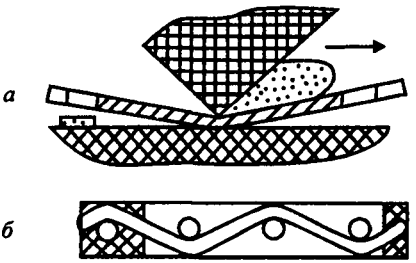


Рис. 7.28. Схема переноса пасты с трафарета на подложку (*а*) и структура сетчатого трафарета (*б*)

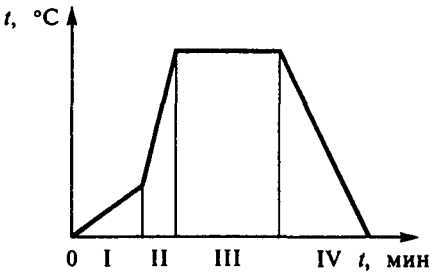


Рис. 7.29. Температурный цикл вжигания пасты

Трафаретная печать. *Трафарет* — проволочная сетка из нержавеющей стали или капроновой нити с нанесенным на нее фотоспособом защитным рисунком. Сетка вмонтирована в металлическую рамку. Керамическая подложка устанавливается под трафаретом с зазором, обеспечивающим деформацию сетки в пределах ее упругости (рис. 7.28). Для этого размеры сетки должны быть существенно больше размеров рисунка. После нанесения дозированного количества пасты движением ракеля она продавливается через открытые участки трафарета и переносится на подложку. Таким образом, контакт трафарета с подложкой происходит по линии, движущейся вместе с ракелем.

В процессе сушки полученного отпечатка удаляются летучие компоненты технологической связки.

Вжигание. На рис. 7.29 приведен типичный температурный цикл *вжигания* пасты. На первой стадии скорость повышения температуры относительно невысока, происходит разложение органической связки и ее удаление интенсивной вытяжной вентиляцией. На второй стадии скорость роста температуры повышают, происходит плавление низкотемпературного стекла и образование суспензии твердых функциональных частиц в расплавленном стекле. Собственно вжигание происходит на третьей стадии при постоянной температуре. При этом имеет место как химическое (взаимодействие окислов стекла и керамики), так и физическое (заполнение стеклом открытых поверхностных пор керамики) сцепление покрытия с подложкой. После выдержки (примерно 10 мин) изделия медленно охлаждают (четвертая стадия) во избежание внутренних напряжений. Общая продолжительность цикла порядка одного часа.

В зависимости от типа производства вжигание осуществляют в камерных печах периодического действия (мелкосерийное производство), либо в туннельных печах непрерывного действия (крупносерийное и массовое производство).

7.14. Коммутационные платы микросборок

Коммутационная плата микросборки представляет собой миниатюрный аналог многослойной ПП. На поверхности коммутационных плат монтируются компоненты микросборки — бескорпусные интегральные МС (кристаллы), микроплаты с группой интегральных тонкопленочных резисторов (согласующих входы и выходы ИМС), одиночные объемные миниатюрные конденсаторы (в качестве развязывающих элементов). Высокая плотность монтажа требует и высокого разрешения коммутационного рисунка. В отличие от ПП его получают путем осаждения тонких пленок в вакууме с последующей фотолитографией, или по толстопленочной технологии. Коммутационные проводники должны находиться на нижних уровнях платы, а на поверхность выходить только монтажные площадки для сварки или пайки выводов (перемычек) компонентов.

В зависимости от материала изолирующих слоев и способа их формирования коммутационные платы можно разделить на четыре типа: тонкопленочные с использованием осаждения в вакууме; тонкопленочные с использованием окисления алюминия в электролите (анодирование); толстопленочные; на основе многослойной керамики.

Тонкопленочные платы

Формирование слоев (уровней) тонкопленочной платы выполняется на общей подложке из электроизолирующего материала (ситалл, поликор и др.) путем повторяющихся циклов осаждение тонкой пленки в вакууме — фотолитография. Из рис. 7.30 следует, что осажденный сплошной слой электропроводящего металла (чаще всего алюминия) после фотолитографии превращается в систему проводников, перпендикулярных плоскости чертежа. В этой системе предусматривают расширенные площадки для контактных переходов на следующий уровень. В осажденном затем в вакууме изолирующем слое с помощью фотолитографии получают окна для контактных переходов, и вновь осаждается электропроводящий слой, в котором фотолитографией формируют систему проводников, ортогональных к нижележащим. При этом через окна в изолирующем слое создается контактный переход. Эти циклы повторяются вплоть до последнего, верхнего уровня металлизации. В последнем изолирующем слое вскрываются лишь окна над монтажными площадками: для электромонтажа ком-

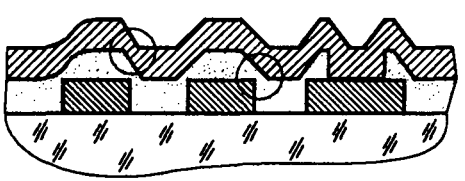


Рис. 7.30. Структура тонкопленочной коммутационной платы (нижние уровни)

понентов и периферийными площадками для монтажа микросборки в целом в модуле следующего уровня (например, на ПП ячейки).

Нетрудно заметить, что с первого же цикла обработки в многоуровневой системе возникает и развивается рельеф, создающий ступеньки в изолирующих и проводящих слоях (на рис. 7.30 отмечены кружками). Эти участки являются потенциальной причиной отказа: в первом случае — пробоя изоляции, во втором — разрушения проводника.

Тонкопленочные платы на основе анодированного алюминия

Сохранение плоскостности покрытий на каждом этапе обработки обеспечивает применение в качестве изолирующих слоев оксида алюминия (Al_2O_3), получаемого путем окисления алюминиевого покрытия в электролите. В зависимости от режимов электролитического окисления (анодирования) можно с малой скоростью роста получить пленку оксида алюминия с высокими электрическими свойствами или ускоренно получить пленку с пониженными электрическими свойствами. В первом случае плотную пленку получают на мягких режимах (малые плотности тока) и используют для изоляции смежных уровней проводников. Во втором случае пористую пленку формируют на форсированных режимах (высокие плотности тока) и используют для изоляции соседних проводников одного уровня, причем снижение пробивной напряженности пленки компенсируется увеличением толщины (точнее — ширины) пленки ($U_{пр}=E_{пр}\,d$).

На рис. 7.31 показана последовательность формирования первого цикла обработки. После осаждения на подложку *1* сплошного слоя алюминия *2* на поверхности формируют фотомаску *3*, рисунок которой соответствует рисунку промежутков между будущими проводниками. Выполнив на мягких режимах избирательное анодирование алюминия, получают тонкий (около 0,2 мкм) и плотный слой *4* Al_2O_3 (рис. 7.31, *а*). Далее (рис. 7.31, *б*) фотомаску удаляют и выполняют анодирование на форсированных режимах на всю толщину пленки *5* (маской при этом служит тонкий плотный слой окисла). Путем фотолитографии (рис. 7.31, *в*) удаляют участки тонкого окисла, не защищенные фотомаской *б*, для

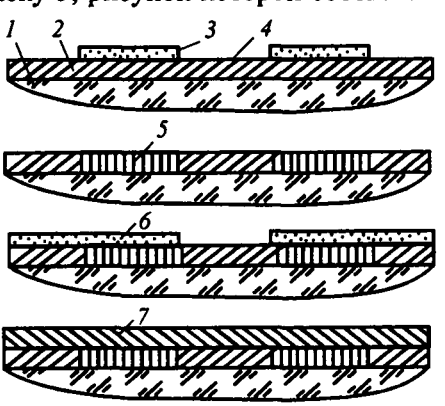


Рис. 7.31. Последовательность формирования коммутационной платы на основе анодированного алюминия (нижние уровни)

создания контактных переходов и напыляют (рис. 7.31, *г*) следующий сплошной слой алюминия *7* (второй уровень металлизации). Затем описанный цикл повторяется.

Толстопленочные платы

Для пояснения сущности процесса воспользуемся рис. 7.30. Вместо циклов «осаждение тонкой пленки в вакууме — фотолитография» в данном случае используются циклы «нанесение пасты через трафарет — сушка — вжигание», а подложку заменяют на керамическую — термостойкий прочный материал.

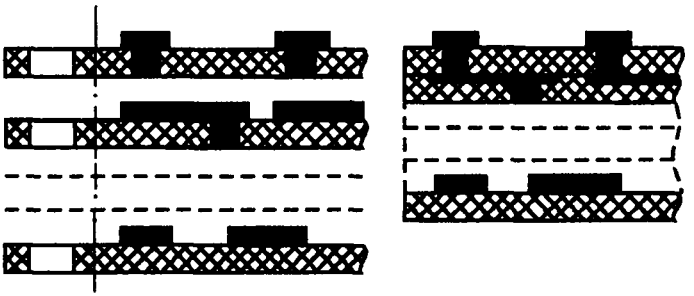
Для формирования многоуровневой системы используют проводящую и диэлектрическую пасты. Поскольку толщина межслойной изоляции в 2—3 раза превышает толщину проводящего слоя, для получения качественных контактных переходов проводят предварительно одно- или двукратное нанесение проводящей пасты в окна изолирующего слоя по циклу «нанесение пасты через трафарет — сушка» (без вжигания). На заключительном этапе изготовления платы аналогичный прием используют для формирования монтажных площадок, которые впоследствии облуживают лудящей пастой.

Следует подчеркнуть, что в многоуровневых системах вжигание паст в керамику происходит лишь на границе нижнего проводящего и нижнего изолирующего слоев с подложкой. Прочность сцепления последующих слоев друг с другом обеспечивается за счет расплавления в них низкотемпературного стекла и затем отвердения.

Платы на основе многослойной керамики. В отличие от предыдущих типов плат, все слои которых формируют на общей подложке, в данном случае каждый проводящий слой наносят на собственную индивидуальную подложку из необожженной («сырой») керамики. Впоследствии отдельные листы керамики с проводящим рисунком собирают в пакет.

Исходными заготовками платы являются листы пластичной керамики толщиной 0,1 мм, полученные методом экструзии (выдавливанием пластичной керамической массы через щелевидный фильер). В отдельных листах керамики пробивкой или сверлением получают базовые отверстия, а затем (базируя листы по этим отверстиям) — отверстия под контактные переходы диаметром не менее 0,1мм (рис. 7.32, *а*). Используя те же базовые отверстия на каждой заготовке, через сетчатый трафарет заполняют отверстия под переходы проводящей пастой, а затем с помощью другого трафарета наносят проводящий рисунок и сушат.

Следует подчеркнуть, что вследствие высоких температур (1400...1700 °С) последующего обжига керамики приходится отказываться



а *б*

Рис. 7.32. Коммутационная плата на основе многослойной керамики:
а — отдельные керамические подложки с проводящим рисунком; *б* — плата в сборе

от высокоэлектропроводных серебряно-палладиевых паст и использовать пасты на основе частиц тугоплавких металлов (вольфрама или молибдена).

Затем, используя те же базовые отверстия, отдельные листы собирают в пакет (рис. 7.32, *б*), подпрессовывают и штамповкой отделяют периферийную часть с базовыми отверстиями. Пакет подвергают высокотемпературной обработке. При этом протекают два параллельных процесса: вжигание проводящего рисунка в керамику и спекание (взаимодиффузия) частиц окислов, из которых состоит керамическая масса. На первой стадии обжига также происходит разложение и удаление пластификатора (технологической связки).

Выходящие на поверхность платы монтажные площадки на основе вольфрама или молибдена не допускают сварки и не смачиваются припоем. Для возможности облуживания таких площадок и последующей их пайки на них предварительно создают слой никеля путем химического осаждения из раствора.

7.15. Крепление подложек и кристаллов

Метод крепления подложек и кристаллов на основании корпуса, кристаллов и других компонентов на подложках зависит от выбора материала присоединительного слоя — клея, стекла, припоя и т. д.

В свою очередь, материал присоединительного слоя должен обеспечивать эффективный отвод теплоты в подложку или корпус в зависимости от выделяемой мощности, согласование температурных коэффициентов расширения (ТКР) соединяемых элементов в широком диапазоне рабочих температур (обычно –60...+125 °С), стойкость к динамическим воздействи-

ям (с ускорением до 150g) в условиях воздействия вибраций и ударов. В отдельных случаях присоединительный слой должен быть электропроводным.

Отвод теплоты от кристалла (компонента) в полых корпусах осуществляется главным образом через присоединительный слой за счет механизма теплопроводности. Эффективность отвода теплоты зависит прежде всего от удельной теплопроводности материала присоединительного слоя, а также его геометрии — толщины и площади. Если считать кристалл и основание под ним изотермическими, а площадь слоя равной площади кристалла, то тепловой поток через слой однороден и тепловое сопротивление слоя, К/Вт,

$$R = h/(\lambda s),$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала слоя, Вт/(см·К) (табл. 7.12); h — толщина слоя, см; s — площадь слоя, см^2.

Достаточно малые тепловые сопротивления (десятые доли К/Вт) имеют присоединительные слои на основе металлических припоев. Тепловое сопротивление спая на основе стекла составляет 60...200 К/Вт. Наибольшим сопротивлением обладают клеевые соединения (вследствие малого коэффициента теплопроводности). Так как перегрев кристалла, т. е. перепад температур в системе «кристалл—основание», зависит от мощности, выделяемой кристаллом ($\Delta t° \sim RP$), то присоединительные слои с большим тепловым сопротивлением можно применять для компонентов, выделяющих малую мощность.

Различие температурных коэффициентов расширения кристалла (подложки) и основания в условиях нагрева или охлаждения вызывает в них внутренние напряжения (растягивающие или сжимающие в зависимости от соотношения ТКР). Эти напряжения имеют максимальные значения на контактных поверхностях присоединительного слоя. При хорошей адгезии напряжения могут превышать предел прочности материала слоя на растяжение или сжатие, так как его прочность обычно ниже прочности соединяемых деталей. Например, слой стекла, имеющий высокую адгезию со многими материалами (до 100 МПа), плохо выдерживает напряжения растяжения.

Температурные деформации на границах слоя уменьшаются, если ТКР слоя имеет промежуточное значение между ТКР материалов соединяемых деталей (табл. 7.12). В этом случае слой выполняет роль своеобразного буфера. Наилучшие условия согласования ТКР создаются при плавном изменении состава (а следовательно, и ТКР) присоединительного слоя. Такие условия, в частности, возникают при пайке контактным плавлением.

При вибрациях, ударах и статических перегрузках на элементы конструкции МС действуют распределенные нагрузки, причем пиковые значения результирующих сил определяются массой элемента и ускорением ($F = ma$). Эти силы в зависимости от направления стремятся сдвинуть или оторвать

Таблица 7.12. **Значения коэффициентов теплопроводности и температурного расширения некоторых материалов**

Материал	λ, Вт/(см·К)	α, $10^{-6}\cdot K^{-1}$	Материал	λ, Вт/(см·К)	α, $10^{-6}\cdot K^{-1}$
Алюминий	2,1	24	Ситалл СТ-50-1	0,017	6
Медь	4,2	16,5	Стекло	0,008	4...12
Никель	0,9	13,3	Эпоксиды:		40...90
Сталь 10	0,7	11,5	без наполнителя	0,006...0,008	
Сплав 29НК	0,2	4,8	с наполнителем	0,008...0,022	
Сплав 47НД	0,25	9	Силиконы		200...290
Эвтектика Au–Si	3,1	—	без наполнителя	0,006...0,01	
Припой Sn–Pb	3,9	26	с наполнителем	0,01...0,025	
Кремний	1,4	4,2	Полиуретаны		100...200
Кварц	0,013	4,5	(без наполнителя)	0,006...0,008	
Керамика 22ХС	0,14	7	Воздух (в малых	0,00025	—
Керамика «Поликор»	0,23	7,6	зазорах)		

элемент. Благодаря малой массе, элементы МС (включая подложку) хорошо противостоят действию статических перегрузок и одиночных ударов. Например, при действии ускорения 150*g* в плоскости керамической подложки размером 30х24 мм сдвиговое усилие составляет около 40 Н, а соответствующее напряжение в присоединительном слое 60 кПа, что примерно в 100 раз меньше предела прочности на сдвиг (адгезии) для соединений на основе современных клеев (единицы МПа).

Более существенное влияние на прочность соединения оказывают длительные вибрационные воздействия (частотой 5...5000 Гц при ускорениях до 40*g*), которые могут привести к усталостным разрушениям в слое. Развитию усталостных разрушений способствуют и температурные деформации, возникающие при изменении температуры во время эксплуатации, а также остаточные температурные деформации в результате нагрева в процессе выполнения операции соединения. Наименее стойкими к вибрационным воздействиям являются соединения стеклом, обладающие хрупкостью и пониженной прочностью на растяжение.

Процесс крепления подложек и кристаллов к основанию можно условно разделить на три этапа:

1) подготовка поверхности основания и нанесение присоединительного материала (клея, стекла, припоя);

2) ориентированная установка кристалла (подложки) на основание;

3) собственно присоединение (в общем случае выполняется под давлением и с нагревом).

Сеткографический способ является наиболее точным и производительным способом нанесения присоединительного материала, обладающего свойствами пасты (клей, суспензия стекла, лудящая паста). Этот способ позволяет обеспечить точную дозировку присоединительного материала, а следовательно, высокую воспроизводимость геометрических размеров соединения. Конструкция корпуса МС должна при этом обеспечивать возможность плотного прилегания сетки к основанию.

Ориентация кристалла непосредственно на основании нежелательна, предварительно кристаллы должны быть ориентированы и уложены в кассеты, откуда вакуумным пинцетом их переносят к месту соединения.

Собственно присоединение можно выполнять индивидуально для каждого кристалла на специальных технологических установках (обычно при соединении пайкой) или групповым способом в кассетах под необходимым давлением с общим нагревом в печах или термостатах (соединения стеклом или склеиванием).

Клеевые соединения используют для МС и компонентов пониженной мощности. Технология клеевых соединений проста и применяется для широкого круга материалов (с использованием клеев на эпоксидной основе) и диапазона рабочих температур (–60...+150 °С, кратковременно до 450 °С). Клеевые соединения стойки к вибрациям.

Основным недостатком эпоксидных смол является высокий ТКР и пониженная теплопроводность, поэтому клеи на основе этих смол всегда содержат наполнители (минеральные или металлические), снижающие значение α и увеличивающие λ. Клеевые соединения характеризуются наличием внутренних напряжений, возникающих вследствие первичной усадки при полимеризации (уплотнение структуры), усадки при охлаждении (при горячем отвердении), разницы ТКР соединяемых деталей и клея.

При склеивании большинство клеев допускают варьирование температуры и времени в широких пределах, причем при повышении температуры время отвердения клея резко сокращается. Режим холодного отвердения осуществляется при комнатной температуре, но требует длительной выдержки (до 48 ч). Поэтому склеивание, как правило, выполняют с подогревом до 60...200 °С в зависимости от марки клея.

Монтаж кристаллов и подложек, предназначенных для работы в герметизированных корпусах, допускается только клеями, не содержащими активных компонентов, которые при температуре эксплуатации выделяются из клеевой прослойки и заполняют объем корпуса. В связи с этим широкое применение находят клеи марок ВК-2, ВК-4, ВК-8 и ВК-9. Основные данные по клеям повышенной теплопроводности (в том числе и электропроводящим) для крепления кристаллов приведены в табл. 7.13.

Качество поверхности соединяемых элементов оказывает большое влияние на прочность клеевого слоя. Поэтому с поверхностей перед склеиванием тщательно удаляют загрязнения и жировые пленки, причем следы используемых органических растворителей должны быть полностью удалены сушкой.

При отвердении клея остаточный растворитель создает пористость и внутренние напряжения, снижающие прочность слоя. Для удаления растворителей, входящих в состав клея, проводят сушку на воздухе в течение 1...1,5 ч, после чего проводят термообработку в соответствии с выбранным режимом отвердения.

Прочность клеевого слоя в объеме зависит от совершенства структуры полимера. Количество дефектов увеличивается с толщиной слоя и прочность соединения падает. Рекомендуется слой ограничивать толщиной 0,05...0,1 мм.

Таблица 7.13. **Свойства электро- и теплопроводящих клеев на эпоксидной основе**

Марка клея	Диапазон рабочих температур, °С	Жизнеспособность, ч (не менее)	Отвердение (при температуре), ч	Коэффициент теплопроводности, Вт/(см·К)	Удельное объемное сопротивление, Ом·см
ЭЧТ Теплопроводящий	–60...+125	10	6 (60 °С) 2,5 (80 °С) 1 (120 °С)	0,005	—
ЭЧВТ Теплопроводящий	–60...+200 400 (30 мин) 450 (15 мин)	10...12	3 (230...250 °С) 3 (150...180 °С с ускорителем)	0,008...0,01	—
ЭЧЭ-Н Электропроводящий (наполнитель Ni)	–60...+150	4	2,5 (100 °С) 1,5 (120 °С) 1 (150 °С)	0,03...0,06	$(0,7...1)\cdot10^{-2}$
ЭЧЭ-С Электропроводящий (наполнитель Ag)	–60...125	4	5 (60°С) 3–4 (80 °С) 1,5 (120 °С)	0,04...0,06	$(3...4)\cdot10^{-3}$
ЭК-А Электропроводящий	–60...150 300 (2 ч)	16	5 (120 °С) 1, 5 (150 °С)	0,02...0,03	$(2...4)\cdot10^{-3}$
ЭВТ Электропроводящий, влагостойкий	–60... 200 400 (30 мин) 450 (15 мин)	10...12	3 (230...250 °С)	0,04	$(2...8)\cdot10^{-4}$

Точную дозировку по толщине и площади клеевого слоя обеспечивают пленочные клеи. Эти клеи представляют собой неполимеризованный подсушенный клей в виде пленки, которую можно разрезать на заготовки нужных размеров и формы. Такие пленки выпускают специализированные заводы в виде лент на основе различных клеев. Широкое применение для крепления подложек гибридных МС к основанию корпуса нашли, в частности, пленки на основе метилполиамиднофенольного клея МПФ-1. Непосредственно перед монтажом для активации поверхности заготовки пленочного клея ее погружают на 1...2 с в этиловый спирт. Далее установленные пленку и подложку помещают в прижимное приспособление с резиновой прокладкой, где выдерживают 1...2 мин. После сушки на воздухе не менее 30 мин изделие подвергают термообработке в термостате (температуру повышают до 150 °С в течение 1 ч, выдерживают 2 ч и охлаждают вместе с термостатом до 30...40 °С).

Пайка стеклами позволяет достичь хорошего согласования соединяемых материалов по ТКР, так как, варьируя состав стекла, можно изменять его ТКР в широких пределах. К легкоплавким стеклам относят стекла, температура размягчения которых не превышает 550 °С. Эти стекла имеют более высокий ТКР (С84-1, С88-1, С89-3, С90-1, для которых ТКР соответственно равны (8,4; 8,8; 8,9 и 9,0)·10^{-6} $К^{-1}$). Для часто используемых сочетаний материалов «ковар—ситалл, поликор, кремний» применяют стекла с ТКР порядка (5...7)·10^{-6} $К^{-1}$, т. е. тугоплавкие (например, С-50).

Использование относительно тугоплавких стекол практически исключает возможность припайки кристаллов стеклом на подложках гибридных пленочных МС и микросборок. Пайку стеклом в основном применяют для крепления керамических, поликоровых и ситалловых подложек. Наилучшая адгезия стекла и, следовательно, прочность соединения обеспечиваются с материалами, представляющими собой смеси окислов (ситалл, поликор, керамика 22ХС), или с металлами, имеющими на поверхности прочный слой окисла.

Технология пайки стеклом сводится к нанесению суспензии (пасты) стеклянного порошка в деионизованной воде на очищенную поверхность, сжатию соединенных деталей в приспособлении-кассете, сушке и последующему оплавлению в печи с контролируемой атмосферой.

Пайка металлическими сплавами обеспечивает высокую электропроводность соединения, механическую прочность, хорошее согласование по ТКР. Благодаря высокой теплопроводности и малой теплоемкости металлических сплавов, необходимое время для плавления и получения соединения достаточно мало, что делает целесообразным выполнение этих операций на специальных установках последовательного присоединения кристаллов с высоким уровнем механизации и автоматизации.

В качестве присоединительного слоя можно использовать *мягкие припои,* такие, как Au—Sn (80 масс. % и 20 масс. %; $t_{пл}$ = 280 °С), Pb—Sn—Ag (92, 5,5 и 2,5 масс. %; $t_{пл}$ = 300 °С) и др. Припой вводят в место соединения в виде фольговых дисков или наносят в виде пасты трафаретным способом. Необходимым условием качественного соединения является высокая смачиваемость соединяемых поверхностей припоем. Для этого кристаллы на установочной плоскости должны иметь слой металлизации (золото, серебро или никель с подслоем хрома), который осаждают на этапе групповой обработки на обратную (нерабочую) сторону групповой пластины. Соответствующая площадка для установки кристалла на подложку (или на основание корпуса) должна иметь никелевое или золотое покрытие.

Пайка мягкими припоями допускает при необходимости демонтаж припаянного кристалла. В то же время относительно низкая температура плавления припоя ограничивает технологическую температуру на последующих операциях присоединения выводов и герметизации МС.

Более высокую температуру плавления (370 °С) имеет *эвтектический сплав* Au—Si (94 и 6 масс. %), который в виде фольгового диска помещают между кристаллом и основанием. Для улучшения смачивания кристалла припоем целесообразны золочение поверхности кристалла и ультразвуковые колебания инструмента, прижимающего кристалл. Рабочую температуру устанавливают в пределах 390...420 °С, т. е. выше температуры эвтектики. Время пайки 3...5 с, давление инструмента 1...3 Н/мм^2.

При пайке любыми эвтектическими сплавами температура плавления сплава невысокая (наименьшая для данной системы). Кристаллизация происходит одновременно по всему объему, т. е. скачкообразный переход из жидкой фазы в твердую обеспечивает мелкозернистость структуры слоя и, следовательно, повышенную прочность.

Разновидностью пайки эвтектическим сплавом Au—Si является соединение кремниевого кристалла с золоченой поверхностью основания (подложки или корпуса) за счет *контактного плавления* без введения припоя (контактно-реактивная пайка). При использовании этого метода нижняя поверхность кристалла должна быть освобождена от пассивной пленки, что достигается стравливанием двуокиси кремния с групповой пластины до разделения. Соответствующие площадки на ситалловой или поликоровой подложке можно получить вакуумным осаждением золота. Площадку на основании металлического корпуса целесообразно формировать локальным гальваническим золочением. Позолоченные площадки на керамических подложках или основаниях корпусов получают вжиганием золотой пасты ПЗП-3 при температуре 950 °С. При сжатии кремниевого кристалла с позолоченной поверхностью с усилием ~0,8 Н при температуре 390...420 °С происходит взаимная диффузия (растворение в

твердой фазе) золота и кремния. Вследствие плавного изменения концентрации компонентов по нормали к соединяемым поверхностям образуется слой, состав которого близок к эвтектическому. При температуре нагрева этот слой переходит в жидкую фазу. С момента возникновения жидкой фазы процессы диффузии и растворения ускоряются, а расплавленный слой быстро расширяется.

Поскольку все виды пайки металлическими припоями, включая пайку контактным плавлением, можно выполнять на механизированных установках, применение флюсов в этих условиях снизило бы эффективность использования таких установок. Поэтому пайку обычно проводят в защитной или защитно-восстановительной среде путем подачи соответствующего газа через миниатюрное сопло в зону пайки. Этот же газ используют для охлаждения полученного соединения.

На площадку для пайки кристалл (а также припойный диск) устанавливают вакуумным пинцетом из кассет с ориентированными кристаллами. Пинцет является инструментом, выполняющим соединение.

Укладка ориентированных кристаллов в кассеты (после скрайбирования, ломки групповой пластины и отбраковки дефектных кристаллов) требует трудоемкой и утомительной ручной работы или специальных сортировочных автоматов. Поэтому представляют интерес различные способы, позволяющие сохранить ориентацию кристаллов после ломки групповой пластины. Один из способов заключается в том, что групповая пластина, прошедшая операции зондового контроля и скрайбирования, наклеивается на эластичную пленку. Ломку пластины проводят прокатыванием ролика по поверхности пластины. Далее пленка на специальном приспособлении растягивается по двум осям (при этом кристаллы раздвигаются, сохраняя ориентацию) и в этом положении фиксируется. После подогрева пленки дефектные кристаллы удаляют вакуумным пинцетом, а остальные погружают в ванночку с растворителем, сушат и переносят в кассету. Описанный способ лежит в основе работы установки ЭМ-226, производительность которой составляет 40 пластин в 1 ч диаметром 80 мм.

Установки для пайки кристаллов (ЭМ-438А, ЭМ-438М) работают в автоматическом и полуавтоматическом режимах. В автоматическом режиме рабочий цикл непрерывно повторяется с определенным тактом, а кассета с корпусами (или отрезок ленты с выводами) перемещается с каждым циклом автоматически на определенный шаг. В полуавтоматическом режиме для выполнения очередного цикла необходим пуск установки оператором. Полуавтоматический режим используют при ручной установке корпусов на рабочую позицию, а также в процессе наладки установки. Технические характеристики установки присоединения кристаллов ЭМ-438 следующие:

Кинематическая производительность, кристалл/ч	2500
Пределы регулирования усилия сжатия, Н	0,85...3
Время пайки, с	0,1...10
Температура нагрева рабочей зоны, °С	250...450
Температура нагрева инструмента, °С	120...300
Давление защитного газа, МПа	0,15
Вакуум, кПа	26,6...46,6
Бесступенчатая регулировка шага подачи ленты, мм	2...24
Размеры, мм	1020×840×1370
Масса, кг	165

Рабочий цикл включает в себя следующие приемы, выполняемые автоматически: захват кристалла инструментом (с вакуумным прижимом), включение нагрева инструмента, перемещение корпуса (ленты) на шаг, установку кристалла, выключение вакуума, включение ультразвукового генератора, пайку, выключение подогрева инструмента и ультразвукового генератора, включение обдува, подъем инструмента и выключение обдува.

7.16. Электрический монтаж кристаллов ИМС на коммутационных платах микросборок

Электромонтаж бескорпусных кристаллов ИМС заключается в электрическом соединении контактных монтажных площадок на поверхности кристалла с контактными монтажными площадками на поверхности коммутационной платы. Обычно кристалл предварительно фиксируют на плате клеем или припоем. Во втором случае групповая пластина до разделения ее на отдельные кристаллы должна быть металлизирована со стороны, противоположной структурам, металлом, который хорошо смачивается припоем. Облуженными должны быть также площадки на плате, на которые устанавливаются кристаллы.

В производстве нашли применение три способа электромонтажа: гибкими проволочными перемычками круглого сечения (проволочный монтаж), гибкими ленточными перемычками прямоугольного сечения (ленточный монтаж) и жесткими объемными выводами, предварительно выращенными на кристалле.

Проволочный монтаж

При проволочном монтаже перемычка формируется в процессе монтажа (рис. 7.33): после совмещения свободного конца проволоки с площадкой на кристалле проводится сварка, далее изделие (коммутационная плата)

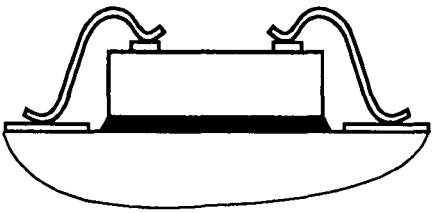


Рис. 7.33. Проволочный монтаж кристалла на коммутационную плату

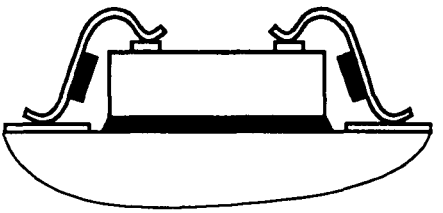


Рис. 7.34. Ленточный монтаж кристалла на коммутационную плату

перемещается так, чтобы под сварочный инструмент пришла соответствующая площадка коммутационной платы; после совмещения инструмента с площадкой проводится сварка и обрезка проволоки. Далее формируется перемычка для следующей пары контактов.

При перемещении платы с приваренным концом проволоки последняя сматывается с катушки неподвижной сварочной головки так, чтобы образовался небольшой избыток по длине. В результате упругости проволоки перемычка получает плавный изгиб вверх, который при температурных изменениях длины перемычки предотвращает замыкание ее на кристалл.

В современных установках для микросварки рабочий цикл сварки автоматизирован (контролируется давление инструмента, нагрев, время выдержки). Что касается вспомогательных приемов (перемещения, совмещения), то существуют установки с ручным перемещением изделия и визуальным совмещением с помощью микроскопа, а также установки с автоматическими программируемыми перемещениями в сочетании с системой «машинного зрения», освобождающей оператора от зрительного напряжения.

Достоинством проволочного монтажа является возможность размещения перемычек при произвольном расположении любого количества монтажных площадок на коммутационной плате, т. е. гибкость в процессе ее конструирования. Недостаток этого способа состоит в высокой трудоемкости монтажа, так как сварные соединения можно получать только последовательно, индивидуально.

Ленточный монтаж

Отказ от проволоки и переход к плоским ленточным перемычкам позволяет изготовить их заранее и одновременно вне кристалла методом избирательного травления (фотолитографии) ленты, взаимное расположение перемычек должно быть жестко предопределено расположением монтажных площадок на кристалле и плате. Ленточные перемычки толщиной 70 мкм являются гибкими, поэтому для сохранения их взаимной ориентации они удерживаются в заданном положении изолирующими перемычками из полиимида (рис. 7.34). Та-

ким образом, исходная лента для изготовления системы перемычек должна быть двухслойной: алюминий (70 мкм) и полиимид (40 мкм). Для исключения замыкания перемычек на кристалл их специально формуют перед монтажом.

Использование ориентированных ленточных перемычек позволяет существенно снизить трудоемкость монтажа. Во-первых, для совмещения всей системы перемычек с кристаллом достаточно совместить две пары «перемычка—площадка», расположенных по диагонали. После приварки всех перемычек на кристалле последний с системой перемычек переносится на плату и аналогично проводится совмещение свободных концов с площадками платы и их приварка. Во-вторых, появляется возможность одновременной (групповой) приварки всех перемычек, расположенных в одном ряду. Из рассмотренных ниже способов сварки для групповой сварки можно использовать *термокомпрессионный* и *ультразвуковой* способы.

К недостатку ленточного монтажа следует отнести ограничения, накладываемые на конструкцию коммутационной платы и самого кристалла по числу и характеру расположения монтажных площадок. Для «смягчения» этого недостатка приходится разрабатывать и изготавливать стандартный ряд систем перемычек, отличающихся числом и шагом расположения.

Монтаж жесткими объемными выводами

Жесткие объемные выводы формируют на кристаллах заранее до разделения групповой пластины. В первом приближении они представляют собой выступы полусферической формы высотой порядка 60 мкм и покрыты припоем. Облуженными должны быть и соответствующие монтажные площадки на коммутационной плате. В отличие от проволочного и ленточного монтажа объемные выводы соединяют с площадками платы пайкой, кристалл при этом оказывается в перевернутом положении, т. е. структурами вниз (рис. 7.35).

Последовательность проведения операции монтажа следующая. Кристалл, находящийся в кассете в ориентированном положении, забирается вакуумным присосом («пинцетом») и переносится в позицию монтажа с определенным зазором. В зазор вводится полупрозрачное зеркало, позволяющее оператору через микроскоп наблюдать одновременно площадки на плате и выводы на кристалле. После совмещения зеркало удаляется из зазора, а присос опускает кристалл на плату и прижимает его. Далее из миниатюрного сопла подается горячий инертный газ, выполняющий одновременно функции и нагревательной,

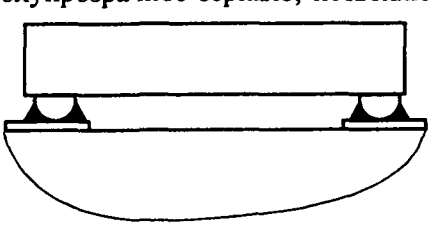


Рис. 7.35. Монтаж кристалла на коммутационной плате с помощью объемных выводов

и защитной среды, а затем холодный инертный газ, на этом цикл монтажа заканчивается.

К достоинствам монтажа жесткими объемными выводами относится: сокращение числа соединений вдвое, что повышает надежность изделия при эксплуатации; сокращение трудоемкости за счет одновременного присоединения всех выводов; уменьшение монтажной площади до площади, занимаемой кристаллом; отсутствие необходимости предварительного механического крепления кристалла.

Ограничением для использования данного метода является необходимость применения коммутационных плат на основе тонких пленок с использованием фотолитографии, т. е. высокого разрешения, так как размеры площадок и шаг их расположения на плате и кристалле должны совпадать.

Микросварка

Микросварку применяют при проволочном и ленточном монтаже. Ввиду малых толщин соединяемых элементов (порядка 1,5 мкм для площадки и несколько десятков микрометров для перемычки) сварка должна выполняться без расплавления соединяемых элементов. Таким образом, все разновидности микросварки представляют собой *сварку давлением*. В этом случае прочность соединения обеспечивается электронным взаимодействием соединяемых поверхностей и взаимодиффузией материалов в твердой фазе, что, в свою очередь, требует применения пластичных материалов и обеспечения плотного контакта на достаточно большой площади. Необходимую площадь контакта можно получить лишь за счет пластической деформации перемычки, следовательно ее материал должен быть пластичным. Для повышения пластичности материала и для ускорения взаимодиффузии, во всех видах микросварки предусматривается нагрев зоны соединения до температуры ниже эвтектической (во избежание расплавления).

Таким образом, все виды микросварки характеризуются температурой в зоне соединения 300...800 °С и удельным давлением инструмента 100...200 Н/мм^2. Конкретные значения режимов определяются материалом перемычки и видом микросварки.

Применеяют следующие разновидности микросварки: термокомпрессионная сварка (ТКС), сварка косвенным импульсным нагревом (СКИН), электроконтактная односторонняя сварка (ЭКОС) и ультразвуковая сварка (УЗС) (рис. 7.36).

Основная тенденция развития методов микросварки — локализация тепла в зоне соединения и уменьшение теплового воздействия на изделие в целом, что позволяет повысить температуру сварки и применять для перемычек менее пластичные материалы (например, медь). Способ нагрева зоны

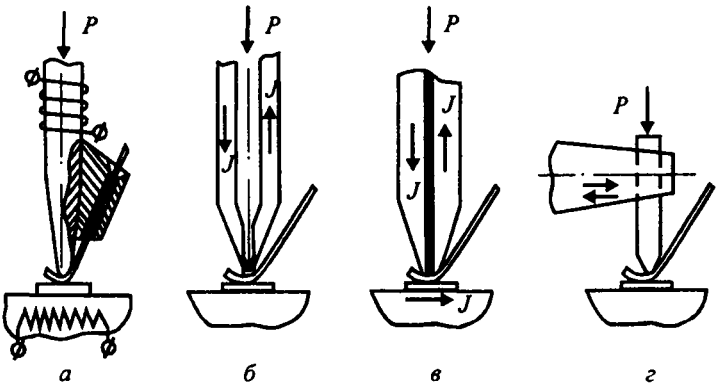


Рис. 7.36. Виды микросварки и разновидности сварочного инструмента: *а* — ТКС; *б* — СКИН; *в* — ЭКОС; *г* — УЗС

соединения находит свое отражение в конструкции сварочного инструмента, схематически представленного на рис. 7.36. Независимо от вида микросварки в случае проволочного монтажа инструмент должен быть снабжен «капилляром» для направления проволоки под рабочую часть инструмента (на рис. 7.36, *а* показан только для ТКС). При ТКС (рис. 7.36, *а*) нагреву подвергают все изделие или инструмент (или то и другое), обеспечивая температуру порядка 400 °С. В случае СКИН (рис. 7.36, *б*) разогрев зоны соединения осуществляется только в момент сварки. Это обеспечивает V-образная конструкция инструмента, через который пропускается амплитудно-модулированный импульс тока с несущей частотой 0,5...1,5 кГц. В результате температуру в зоне сварки можно повысить до 650 °С. Инструмент является частью электрической цепи и благодаря малому сечению рабочего конца инструмента выделяемое тепло концентрируется именно в этой части. Инструмент для ЭКОС (рис. 7.36, *в*) часто называют расщепленным: он состоит из двух частей, разделенных изолирующей термостойкой прокладкой, которые являются составной частью электрической цепи. Последняя замыкается лишь при контакте с перемычкой. Таким образом, импульс тока проходит через свариваемый участок перемычки, причем тепло выделяется в зоне контакта. В установках для ЭКОС предусмотрено автоматическое измерение контактного сопротивления, регулирование по сопротивлению усилия и формирование параметров импульса тока, что повышает воспроизводимость характеристик соединения. Температура в зоне сварки составляет 800 °С, что дает возможность применять медные перемычки. Ультразвуковую сварку можно выполнять без специально организованного нагрева, так как тепло, необходимое для повышения пластичности, выделяется в результате трения перемычки о площадку. Сварочный инструмент жестко закреп-

ляется в концентраторе магнитострикционной головки (рис. 7.36, *г*) и вместе с ним совершает продольные колебательные движения, «втирая» перемычку в площадку. Частота ультразвуковых колебаний выбирается в пределах 20...60 кГц, а амплитуда — 0,5...2 мкм.

В табл. 7.14 приведены сведения по свариваемости материалов при различных методах микросварки.

Таблица 7.14. **Свариваемость материалов при различных методах микросварки**

Материал монтажной площадки	Метод микросварки, материал перемычек											
	ТКС			СКИН			ЭКОС			УЗС		
	Au	Al	Cu	Au	Al	Cu	Au	Al	Cu	Au	Al	Cu
Au	++	+	–	++	++	+	++	–	++	++	++	+
Cu или Ni	++	+	–	++	+	+	++	–	+	++	+	+
Al	++	+	–	+	+	–	+	–	+	+	++	–

Примечание: ++ — свариваются хорошо; + — свариваются удовлетворительно; – — не свариваются.

Изготовление системы ленточных перемычек

Исходным материалом является двухслойная лента (в рулоне): алюминий толщиной 70 мкм и полиимид толщиной до 100 мкм. В непрерывной ленте последовательно кадр за кадром изготавливаются с помощью двухсторонней фотолитографии элементы проводящего рисунка в алюминиевой пленке и изолирующие элементы в слое полиимида. На рис. 7.37 показан пример кадра, на котором полиимидный рисунок зачернен и находится под проводящим рисунком. В кадре можно выделить несколько зон: *1* — контакты для контроля качества приварки перемычек к кристаллу (впоследствии эта зона отделяется вырубкой из кадра); *2* — внешние концы перемычек (впоследствии привариваются к площадкам коммутационной платы в случае большого шага их расположения); *3* — внешние концы перемычек для плат с малым шагом размещения площадок (в этом случае зона *2* отделяется от кадра вместе с зоной *1*); *4* — зона кристалла

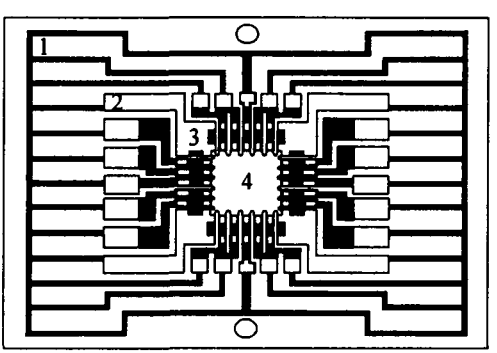


Рис. 7.37. Кадр ленточного носителя с кристаллом БИС

(показано соединение внутренних концов перемычек с монтажными площадками кристалла).

Систему перемычек изготавливают на автоматических линиях непрерывного действия. Лента сматывается с исходного рулона, при этом она проходит все стадии обработки, присущие фотолитографическому процессу, через ванны, распылительные форсунки и другие устройства и в конце обработки наматывается в рулон. В позиции экспонирования очередной участок ленты (кадр) останавливается. Благодаря устройствам с накопительными петлями движение ленты на остальных позициях не прерывается. После обработки ленту разрезают на кадры, совмещают внутренние концы перемычек с площадками кристалла и приваривают их, контролируют качество присоединения, отделяют зону *1* (или совместно с зоной *2*), формуют перемычки, наносят клей на монтажную поверхность платы, совмещают наружные концы и приваривают их.

Изготовление системы объемных выводов

Для формирования *объемных выводов* стандартный процесс, заканчиваемый осаждением защитной пленки SiO_2 и образованием в ней окон над монтажными площадками, дополняют рядом операций, выполняемых в групповой пластине, т. е. до разделения ее на отдельные кристаллы.

Для будущих круглых выводов в защитном окисле выполняют круглые окна диаметром 70 мкм. Методом осаждения в вакууме на всю поверхность пластины наносят слой ванадия (для восстановления алюминия из поверхностного окисла и уменьшения контактного сопротивления) и меди (для замыкания всех выводов и возможности последующего гальванического наращивания). Толщина каждого из слоев — несколько десятых долей микрометров (рис. 7.38, *а*). После формирования фотомаски, открывающей лишь участки будущих выводов, гальваническим методом выращивают слой меди толщиной порядка 50...60 мкм. Используя ту же фотомаску,

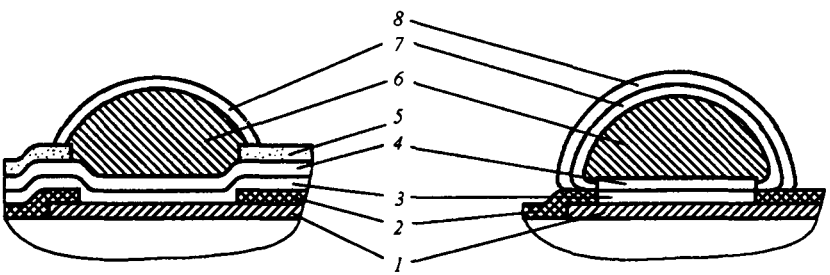


Рис. 7.38. Структура жестких объемных выводов на кристалле ИМС:
1 — алюминий; *2* — двуокись кремния; *3* — ванадий; *4* — тонкая медь; *5* — фотомаска; *6* — гальваническая медь; *7* — серебро; *8* — припой

гальванически наносят слой серебра толщиной в несколько микрометров. Серебро служит для защиты меди от окисления, а впоследствии — в качестве маски для стравливания тонкой меди и ванадия.

Затем (рис. 7.38, *б*) фотомаску удаляют и последовательно стравливают слои меди и ванадия (выводы электрически разобщаются). После чего горячим лужением (контакт пластины с расплавленным припоем) получают на выводах слой припоя. Во избежание растворения серебра оловом припоя в состав припоя ПОС-61 вводится 3 % серебра (припой ПСрОС-3-58).

7.17. Герметизация микросхем и микросборок

Защиту МС и микросборок от механических повреждений и воздействия окружающей среды обеспечивают использованием различных методов герметизации. Различают *корпусную* (с использованием полых или монолитных конструкций) и *бескорпусную* герметизацию.

Бескорпусная герметизация

Большинство полупроводниковых приборов и ИС, используемых в бытовой и электронно-вычислительной аппаратуре, выполняют в пластмассовых корпусах. По сравнению с другими методами процесс герметизации пластмассами характеризуется высокой производительностью, относительно низкой стоимостью и простотой.

Для герметизации МС используют различные полимеры с добавками, влияющими на пластичность, текучесть, цвет, скорость отвердения пластмасс. *Текучесть* характеризуется временем, в течение которого герметизирующий состав находится в вязком состоянии при заданной температуре окружающей среды. *Скоростью отвердения* называют скорость перехода пластмасс в состояние полной полимеризации.

В зависимости от поведения при нагревании пластмассы делят на *термопласты* и *реактопласты*. Термопласты сохраняют свои свойства при многократном нагреве. Реактопласты под воздействием повышенной температуры переходят в необратимое состояние. В качестве герметизирующих материалов используют компаунды (механические смеси из электроизоляционных материалов, не содержащие растворителей) и пресс-порошки на основе эпоксидных, кремнийорганических, полиэфирных смол.

Эпоксидные смолы характеризуются плотностью $\gamma = 2{,}5...3$ г/см^3, термостойкостью $T = 150...230$ °С, коэффициентом диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 4...5$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta = 0{,}01$.

Кремнийорганические смолы характеризуются плотностью $\gamma = 1...5$ г/см^3, термостойкостью $T = -60...+300$ °С, коэффициентом диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 2{,}8...3{,}6$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta = 0{,}003—0{,}005$.

Полиэфирные смолы характеризуются плотностью $\gamma = 0{,}7...0{,}8$ г/см^3, термостойкостью $T = 150$ °С, коэффициентом диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 2{,}8...5{,}2$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta = 0{,}005$.

Герметизация методом обволакивания. При герметизации обволакиванием вокруг МС создается тонкая пленка полимерного материала. Для обеспечения механической прочности и герметичности полупроводниковых приборов и МС наносят несколько слоев герметизирующего состава с предварительным подсушиванием каждого слоя.

Метод герметизации обволакиванием характеризуется устойчивостью защищаемых приборов к воздействию влажной атмосферы, простотой процесса, малым расходом герметизирующего материала, возможностью применения групповых методов обработки.

Технологический процесс обволакивания состоит из следующих основных операций:

закрепление арматуры (выводов) и полупроводниковой структуры в приспособлении;

силанирование (нанесение гидрофобного защитного покрытия на основе кремнийорганических полимеров);

нанесение защитного закрепляющего состава;

нанесение и полимеризация герметизирующего состава;

контроль качества герметизирующего покрытия.

Способ нанесения герметизирующего состава зависит от габаритных размеров защищаемого изделия. На дискретные полупроводниковые приборы герметизирующий состав наносят в виде капли (рис. 7.39). Полупроводниковые ИС, гибридно-пленочные схемы и микросборки герметизируют окунанием или нанесением компаундов распылением.

К недостаткам метода обволакивания МС относятся трудность нанесения равномерного по толщине покрытия, длительность процесса сушки на воздухе, необходимость последующего отвердения при повышенной температуре, сложность механизации процесса.

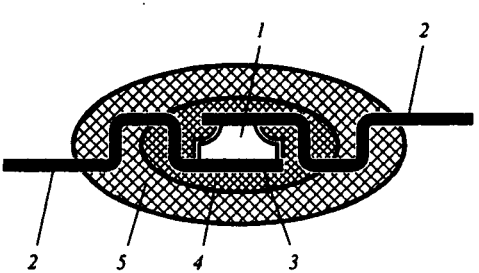


Рис. 7.39. Герметизация полупроводниковых структур методом обволакивания:

1 — полупроводниковая структура; *2* — вывод; *3* — силановая пленка; *4* — защитный закрепляющий слой компаунда; *5* — герметизирующий слой компаунда

Герметизация микросхем методом свободной заливки. Сущность метода герметизации МС методом свободной заливки состоит в заполнении жидким герметизирующим компаундом специальных форм или заранее изготовленных из пластмассы или металла корпусов, в которых размещают МС с выводами. Свободная заливка компаунда без давления уменьшает вероятность обрыва проволочных перемычек МС.

Применяют два метода свободной заливки: во вспомогательные разъемные формы и предварительно изготовленные корпуса.

Герметизацию микросхем *заливкой во спомогательные разъемные формы* относят к бескорпусной, так как такая герметизация не требует специально изготовленных деталей корпусов. Однако она обеспечивает производство МС со строго фиксированными габаритными размерами, размерами выводов, шага между выводами и т. д. Поэтому в литературе принято называть такой метод заливки МС герметизацией в пластмассовые корпуса, которые иногда называют полимерными или металлополимерными.

В зависимости от конструкции прибора или МС применяют два способа заливки во вспомогательные формы — с предварительным подогревом и без подогрева разъемных форм. При герметизации по первому способу многоместные разъемные формы, изготовленные из материалов с плохой адгезией по отношению к пластмассе, заполняют жидким компаундом с помощью дозатора. Собранные на ленте полупроводниковые структуры по-

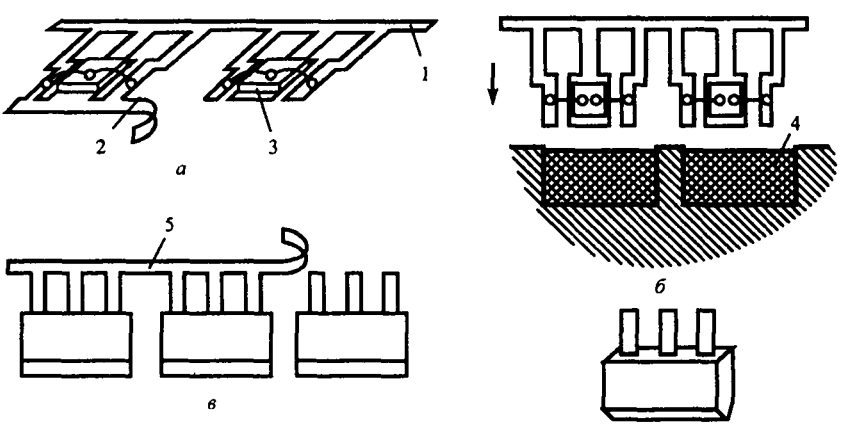


Рис. 7.40. Герметизация микросхем методом свободной заливки в формы без подогрева:

а — монтаж полупроводниковой структуры на перфорированную ленту; *б* — герметизация групповым методом; *в* — удаление второй технологической перемычки; *г* — общий вид загерметизированного прибора; *1* — перфорированная лента с кристаллами; *2* — первая технологическая перемычка; *3* — полупроводниковая структура; *4* — полости формы, заполненные компаундом; *5* — вторая технологическая перемычка

гружают в заполненные компаундом полости формы, после чего проводят полимеризацию компаунда (рис. 7.40, *б*). После полимеризации приборы извлекают из формы и с помощью специальных штампов отделяют друг от друга (рис. 7.40, *в* и *г*).

При герметизации по второму способу собранные на ленте полупроводниковые структуры помещают в рабочие гнезда нижней матрицы многоместной заливочной формы и плотно прижимают верхней матрицей. В верхней части формы предусмотрены специальные отверстия, а между гнездами внутри формы — система каналов для подачи герметизирующего компаунда. Нагретую форму заполняют компаундом. Нагрев формы необходим для повышения текучести компаунда. После предварительного отвердения компаунда заливочные формы охлаждают и извлекают ленты с загерметизированными приборами. Приборы на металлических лентах проходят термообработку до полной полимеризации. После полимеризации снимают облой и ленту разделяют на отдельные фрагменты, удаляя вторую технологическую перемычку. Полученные изделия представляют собой готовые загерметизированные приборы.

При герметизации *заливкой в предварительно изготовленные корпуса* полупроводниковые структуры сначала закрепляют на перфорированную ленту, состоящую из объединенных между собой фрагментов плоских выводов. Контакт между плоскими выводами перфорированной ленты и контактными площадками полупроводниковой структуры создают проволочными перемычками (рис. 7.40, *а*).

Герметизация МС заливкой в предварительно изготовленные корпуса отличается простотой, так как в этом случае не требуется изготовление дорогостоящих заливочных форм. Корпуса представляют собой пластмассовую оболочку, изготовленную горячим прессованием, или металлическую капсулу, изготовленную штамповкой. Они имеют разнообразную геометрическую форму и типоразмеры.

Заливку в корпуса-оболочки осуществляют в основном теми же герметизирующими составами, что и заливку в формы. После полимеризации герметизирующего компаунда эти корпуса остаются частью МС (рис. 7.41).

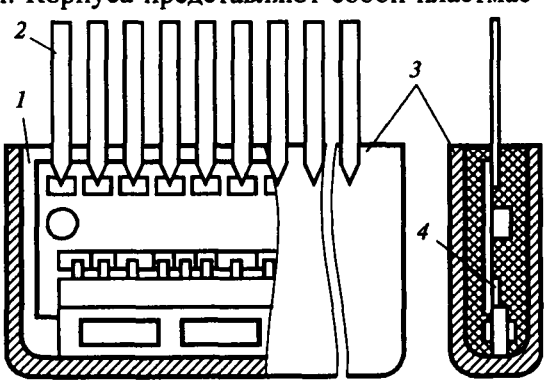


Рис. 7.41. Герметизация микросхем методом заливки в корпуса:

1 — плата с навесными компонентами; *2* — выводы; *3* — корпус; *4* — заливочный компаунд

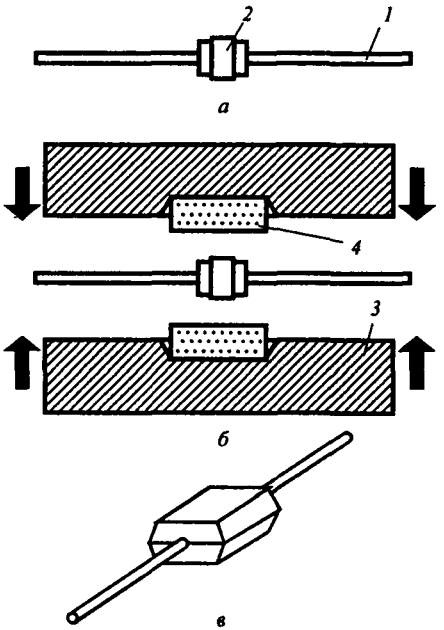


Рис. 7.42. Герметизация микросхем методом компрессионного прессования:

а — арматура с полупроводниковой структурой; *б* — загрузка арматуры с полупроводниковой структурой и пресс-порошка; *в* — загерметизированный прибор; *1* — выводы; *2* — полупроводниковая структура; *3* — пресс-форма; *4* — пресс-порошок

Герметизацию полупроводниковых структур методом свободной заливки применяют в мелкосерийном производстве изделий со сложной арматурой.

Герметизация прессованием. Герметизация МС методом прессования пластмасс основана на особенности некоторых полимерных материалов плавиться и течь под действием температуры и давления, заполняя полость металлической формы с изделиями. В этом случае используют полимеры в виде пресс-порошков и таблеток, которые не изменяют своих свойств в течение длительного времени, что исключает операцию приготовления герметизирующих компаундов. В качестве герметизирующих материалов применяют термореактивные полиры, прессующиеся при низких давлениях, что позволяет герметизировать МС с гибким проволочным монтажом.

В микроэлектронике используют в основном два способа герметизации МС прессованием: компрессионное и литьевое (трансферное).

При *компрессионном прессовании* собранную с арматурой полупроводниковую структуру и порошкообразный или таблетированный материал загружают непосредственно в пресс-форму (рис. 7.42). Под действием тепла и давления герметизирующий материал переходит в пластичное состояние и заполняет формующую полость. После окончания выдержки опрессованные изделия извлекают из пресс-формы (рис. 7.42, *в*).

При *литьевом* (*трансферном*) *прессовании* загрузочная камера пресс-формы отделена от формующей полости. Кассету или перфорированную ленту с несколькими смонтированными полупроводниковыми структурами помещают в формующие полости пресс-формы. Пресс-форму нагревают до температуры плавления пластмассы нагревателями, вмонтированными непосредственно в пресс-форму. Расплавившаяся пластмасса под давлением опускающегося пуансона (трансфера) заполняет формующие полости пресс-формы. После частичной полимеризации кассету или перфорированную

ленту с полупроводниковыми структурами извлекают из пресс-формы и окончательно полимеризуют. Загерметизированные полупроводниковые структуры извлекают из кассеты и отделяют друг от друга.

К недостаткам метода свободной заливки в формы относятся сравнительно невысокая производительность и необходимость проводить приготовление заливочных смесей в небольших количествах, так как со временем очень быстро изменяется их вязкость.

Шовноклеевая герметизация. При шовноклеевой герметизации используют пластмассовые корпуса с армированными выводами (рис. 7.43). Клеющий состав наносят по периметру основания корпуса после установки на него кристалла МС. На основание корпуса устанавливают пластмассовую крышку. Сборку фиксируют в приспособлении и сушат на воздухе или в термошкафу. Достоинствами шовноклеевой герметизации являются высокая технологичность процесса и низкая стоимость изделий.

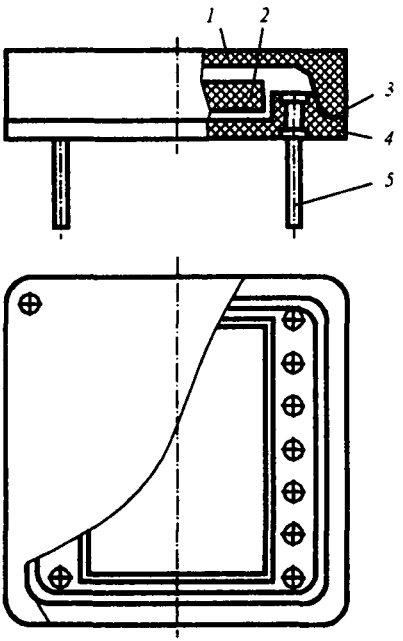


Рис. 7.43. Шовноклеевая герметизация микросхем:

1 — крышка; *2* — подложка с микросхемой; 3 — место склеивания; *4* — основание корпуса; *5* — армированный вывод

Корпусная герметизация микросхем

Полимерные материалы не обеспечивают полной защиты МС от влаги. Это связано с тем, что влагопроницаемость пластмасс во много раз выше, чем у металлов; температурные коэффициенты линейного расширения пластмасс и металлических выводов МС отличаются примерно на порядок, поэтому трудно создать герметичное соединение между пластмассой и металлом. Надежным методом герметизации полупроводниковых приборов, МС и гибридно-пленочных микросборок является вакуум-плотная корпусная герметизация.

Корпуса МС являются композитными конструкциями, которые характеризуются тем, что механические напряжения в них возникают даже при равномерном изменении температуры и концентрируются в местах сопряжения материалов с различными термомеханическими свойствами.

Корпуса МС и микросборок должны защищать их от воздействия окружающей среды и механических повреждений; обеспечивать удобство монтажа кристаллов и подложек и герметизацию корпуса без изменения параметров кристалла и навесных компонентов; выдерживать механические воздействия и термоциклирование; отводить тепло в процессе сборки и эксплуатации изделий; обеспечивать надежность сборки и эксплуатации прибора; защищать кристалл и навесные компоненты от загрязнений пылью, газообраразными химическими загрязнениями, солями и парами воды; быть дешевыми и технологчными в изготовлении; при монтаже на ПП обеспечивать удобство и надежность монтажа и коррозионную стойкость; обеспечивать контроль МС до и после монтажа; обладать корррозионной стойкостью, высокой надежностью, технологичнсостью и низкой себестоимостью.

В зависимости от используемых материалов вакуум-плотные корпуса микросхем и микросборок подразделяют на стеклянные, металлостеклянные, металлокерамические, керамические, пластмассовые и металлопластмассовые.

Для изготовления оснований, крышек и выводов МС и микросборок применяют различные металлы и сплавы, основные свойства которых приведены в табл. 7.15.

Таблица 7.15. **Основные свойства металлов и сплавов, применяемых для изготовления оснований, крышек и выводов МС и микросборок**

Свойства	Медь	Никель	Сталь 10	Ковар	Платинит
Плотность, г/см^3	8,96	8,9	7,86	8,35	8,9
Температура плавления, °С	1083	1452	1535	1450	—
КТР, 10^{-7} °С$^{-1}$	165	133	125	43...54	80...100
Теплопроводность, Вт/(м ·К)	386	84	73	20	170
Удельное сопротивление, Ом · м	0,017	0,068	0,096	0,49	0,057
Твердость по НВ, Н/м^2					
в неотожженном состоянии	1170	1960	1170	2440	—
в отожженном состоянии	490	880	880	1570	—
Предел прочности, Н/м^2					
в неотожженном состоянии	480	980	607	—	—
в отожженном состоянии	244	536	272	614	—
Относительное удлинение, %					
в неотожженном состоянии	4,2	2,0	7,5	—	18
в отожженном состоянии	50	35	40	50	—
Сопротивление срезу, Н/м^2					
в неотожженном состоянии	255	460	284	—	—
в отожженном состоянии	176	344	—	510	—

Примечание. КТР — коэффициент температурного расширения.

Для повышения коррозионной стойкости, образования технологических пленок для последующей герметизации, получения высокой чистоты поверхностей и улучшения внешнего вида корпусов применяют различные *покрытия*, которые наносят гальваническим или химическим способом. Твердость защитных и технологических покрытий влияет на жесткость режимов при герметизации корпусов электроконтактными видами сварки. Основные виды покрытий, применяющихся для корпусов МС, и их твердость приведены в табл. 7.16.

Таблица 7.16. **Виды покрытий корпусов МС и их твердость**

Вид покрытия	Твердость НВ
Золочение	185
Серебрение	250
Палладирование	660
Никелирование	850

Металлические детали корпусов изготавливают чаще всего холодной штамповкой; фланцы и крышки корпусов — вытяжкой, вырубкой и объемной штамповкой; перфоленты и рамки — на вырубных штампах; штырьковые выводы корпусов получают резкой проволоки на отрезки определенной длины на автоматах различных конструкций.

В *металлостеклянных корпусах* МС со штырьковыми или планарными выводами в качестве электроизоляционного материала используют стекло. Для изготовления стеклянных деталей и элементов, содержащих спаи стекла с металлом, используют стеклянные трубки (капилляры), стеклопорошки и стеклотаблетки. Стеклянные трубки (капилляры) нарезают на бусы алмазным диском с наружной режущей кромкой. Перед резкой стеклокапилляр наклеивают на стеклянную подложку, которую затем закрепляют на столе станка. Общий вид круглого металлостеклянного корпуса представлен на рис. 7.44.

Керамические безвыводные корпуса (*микрокорпуса*) состоят из трех слоев: один с проводниками, другой с контактными площадками, третий — защитный нижний слой. К достоинствам безвыводных микрокорпусов следует отнести высокую герметичность, высокую плотность размещения их на печатных платах, совместимость с керамическими подложками гибридных микросборок.

Кроме безвыводных микрокорпусов промышленность выпускает микрокорпуса с матрицами выводов. На рис. 7.45 приведены примеры микрокорпусов безвыводных (*а*) и с матрицей выводов (*б*).

Металлокерамические корпуса МС являются наиболее трудоемкими и дорогими. В качестве изоляционного материала в них применяют алюмоок-

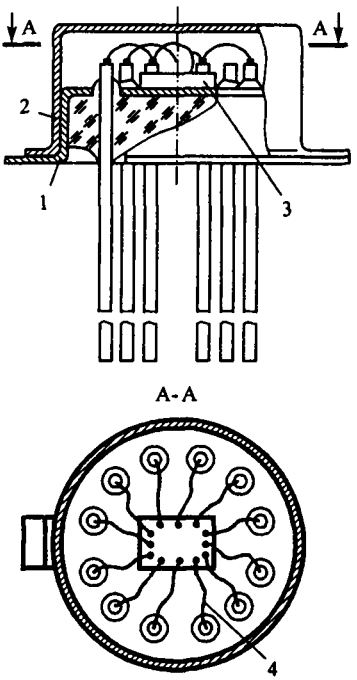


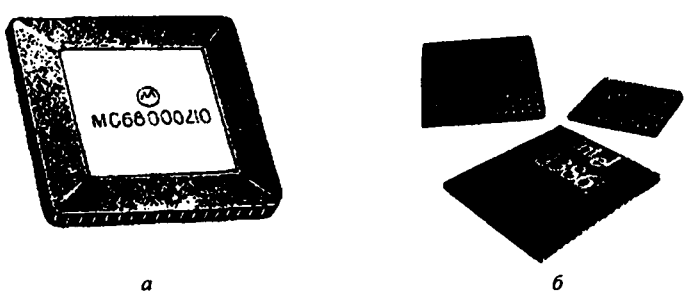
Рис. 7.44. Полупроводниковый кристалл в металлостеклянном корпусе со штырьковыми выводами:

1 — основание; *2* — крышка корпуса; *3* — полупроводниковый кристалл; *4* — выводы

сидную или корундовую керамику с высоким содержанием оксида алюминия. Она обладает хорошей вакуумной плотностью (в 10^7 раз плотнее меди); высокой непроницаемостью как для гелия, так и для водорода; высокой прочностью, термо- и радиационной стойкостью; надежностью при эксплуатации в тропических условиях; высоким электрическим сопротивлением; относительно хорошей теплопроводностью; низкими диэлектрическими потерями при недорогом исходном материале; хрупкостью и твердостью, что позволяет обрабатывать ее только алмазным инструментом и шлифованием.

Коэффициент температурного расширения алюмооксидной керамики в два раза выше, чем у кремния, поэтому при монтаже кристаллов с размерами более 3х3 мм на основание корпуса эвтектикой «золото-кремний» возникают проблемы, связанные с несогласованностью коэффициентов температурного расширения кремния и керамики.

Металлокерамические корпуса изготавливают из трех слоев керамической ленты. При этом верхняя и средняя ленты имеют форму рамки. На верхнюю поверхность средней ленты с помощью трафарета молибденовой пастой наносят рисунок, который связывает контактные площадки корпуса с выводной рамкой. На нижней ленте выполняют рисунок посадоч-



а *б*

Рис. 7.45. Керамический безвыводной микрокорпус (*а*) и микрокорпуса с матрицей выводов (*б*)

ной площадки и ее соединение с земляным контактом выводной рамки. На верхнюю ленту, внутренние размеры которой на 1 мм больше средней рамки, наносят рисунок кольца для крышки. Молибденовую пасту вжигают при температуре 1350 °С в течение 40 мин в водороде. Затем к корпусу твердым припоем ПСр-72 в сухом воздухе припаивают выводную рамку из никеля и рамку для герметизации. Плоский металлокерамический корпус с планарными выводами представлен на рис. 7.46.

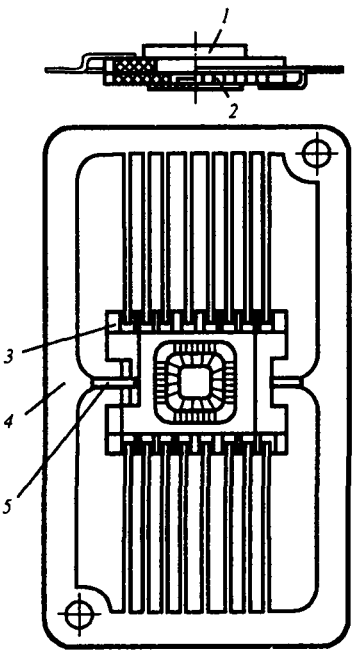


Рис. 7.46. Плоский металлокерамический корпус с планарными выводами:

1 — крышка корпуса; *2* — теплоотвод; *3* — основание корпуса; *4* — выводная рамка; *5* — технологический вывод

Пластмассовые микрокорпуса изготавливают из полимеризующейся при термообработке пластмассы. Выводы под пластмассовым основанием микрокорпуса имеют изгиб, благодаря чему монтаж можно осуществлять непосредственно на поверхности печатной платы (рис. 7.47). По сравнению с керамическими пластмассовые микрокорпуса более устойчивы к термоударам и дешевле.

Герметизация корпусов клеем. Приклеивание крышки к основанию корпуса применяют при герметизации приборов в корпусах больших габаритов, к которым предъявляются невысокие требования по герметичности, или для наклеивания оптических окон (стекло, германий и т. д.) на металлическую рамку, используемую в качестве крышки корпуса. Для приклеивания крышек корпусов применяют различные клеевые составы с высокой вязкостью в жидком состоянии; а для приклеивания оптических окон — порошковые клеевые составы, состоящие из смеси эпоксидного мономера, ангидридного отвердителя, пластифицирующего модификатора и мелкодисперсного неорганического наполнителя. На площадь склеивания до 0,5 мм^2 клей наносят напрессовкой, а на бóльшую поверхность клей протирают через проволочный трафарет. Затем клей оплавляют при температуре 140...150 °С с образованием формополимера. Крышки помещают в специальные кассеты клеем вверх, сверху укладывают основания корпусов и помещают в термошкаф. Процесс склеивания состоит из процесса желирования (при температуре 155...160 °С в течение 10...20 ч) и процесса отвердения (при температуре 155...160 °С в течение 24 ч).

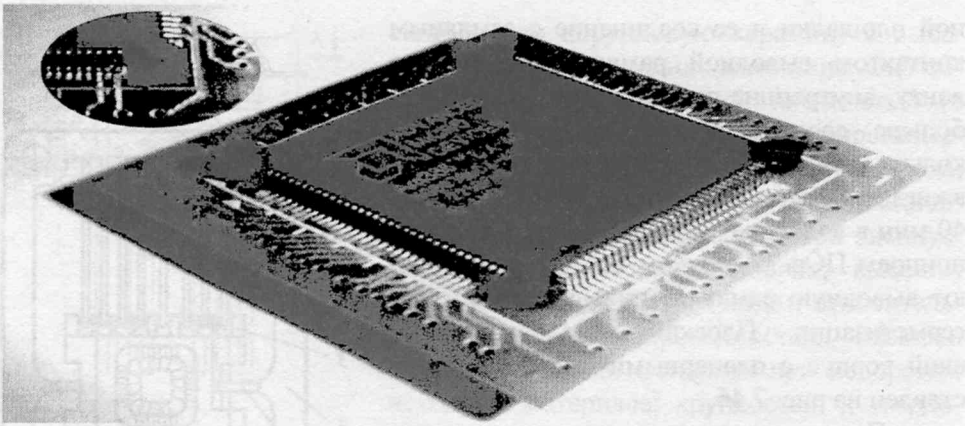


Рис. 7.47. Пластмассовый микрокорпус

Герметизация корпусов пайкой. Пайку применяют для герметизации приборов с большими габаритными размерами в плоских корпусах. Процесс герметизации пайкой состоит в соединении металлических или металлизированных деталей корпусов с помощью припоя, который, расплавляясь, заполняет капиллярный зазор между ними.

Для герметизации корпусов пайкой используют мягкие припои на основе олова и свинца типа ПОС-61 (температура пайки около 240 °С) и свинцово-серебряный припой Пср-2,5 (температура пайки около 340 °С). Низкотемпературную пайку ведут в печах при нагреве конвекцией и струей горячего газа.

Герметизация корпусов холодной сваркой. Герметизацию корпусов полупроводниковых приборов холодной сваркой осуществляют по замкнутому контуру корпуса без нагрева. Вакуум-плотное сварное соединение образуется за счет деформации свариваемых деталей с использованием гидравлических, пневматических, пневмогидравлических и механических прессов, обеспечивающих необходимое усилие сжатия. Детали корпусов, которые герметизируются холодной сваркой, изготавливают из пар металлов медь — медь, медь — сталь, медь — ковар. В качестве основания корпуса служит фланец, который содержит выводы, изолированные от него стеклом или керамикой. Крышку корпуса изготавливают в виде баллона с отбортовкой (рис. 7.48, *а*).

Различают одностороннюю и двустороннюю холодную сварку. При односторонней сварке (рис. 7.48, *б*) в основном деформируется по замкнутому контуру только одна из свариваемых деталей. Эта сварка предпочтительна для герметизации корпусов, детали которых изготавливают из разнородных металлов. В этом случае устраняется опасность образования сильно

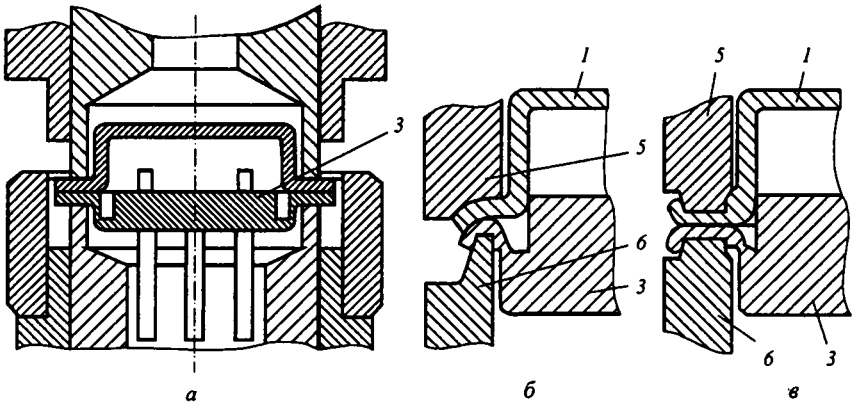


Рис. 7.48. Схема холодной сварки:

а — положение корпуса в установке сварки с предварительным сдавливанием; *б* — односторонняя сварка; *в* — двусторонняя сварка; *1* — крышка (баллон); *2* — пуансон предварительного сдавливания; *3* — основание корпуса; *4* — матрица предварительного сдавливания; *5* — сварочный пуансон; *6* — матрица

подрезанного участка шва с наружной стороны детали из более пластичного металла и, следовательно, нарушение герметичности в процессе эксплуатации прибора. При двусторонней холодной сварке (рис. 7.48, *в*) по замкнутому контуру деформируются обе свариваемые детали.

Герметизация корпусов аргонно-дуговой сваркой. Аргонно-дуговую сварку выполняют в среде инертного газа (аргона) плавящимися или неплавящимися электродами в специальных камерах (скафандрах), заполненных инертным газом, или при подаче инертного газа непосредственно в зону сварки. Для поддержания непрерывного горения дуги при переходе с герметизации одного корпуса на другой иногда используют дополнительную дугу, мощность которой составляет 10...15 % мощности основной дуги.

Основными параметрами аргонно-дуговой сварки являются сварочный ток, скорость сварки, длительность импульса, частота следования импульсов, длительность паузы, давление защитного газа в рабочей камере.

Схема образования сварного соединения при герметизации корпусов аргонно-дуговой сваркой представлена на рис. 7.49.

Достоинствами аргонно-дуговой сварки являются возможность регулирования длительности нагрева и охлаждения в зоне соединения, простота управления процессами диффузии и дегазации жидкого металла.

К недостаткам аргонно-дуговой сварки следует отнести нестабильность горения дуги, высокие требования к изготовлению деталей корпусов (ограничение свариваемых пар материалов, минимальные отклонения их по толщинам, плоскостности, ширине и смещению) и оснастки, влияние по-

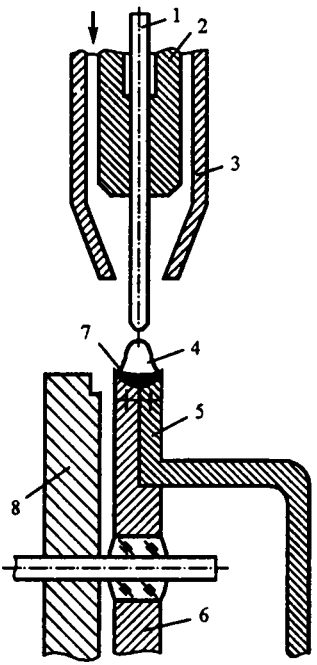


Рис. 7.49. Схема образования сварного соединения при герметизации корпусов аргонно-дуговой сваркой:

1 — вольфрамовый электрод; *2* — цанга; *3* — сопло; *4* — дуга; *5* — крышка корпуса; *6* — основание корпуса; *7* — сварное соединение; *8* — приспособление для крепления корпуса

крытий на качество сварных соединений, необходимость применения эффективных теплоотводов, исключающих нагрев выше допустимой температуры.

Герметизация корпусов лазерной сваркой. Герметизация лазерной сваркой предусматривает формирование непрерывного сварного шва за счет перекрывающихся сварных точек, образующихся в результате превращения импульсов световой энергии в тепловую при воздействии сфокусированного лазерного луча (рис. 7.50). Коэффициент перекрытия сварных точек для герметичных швов должен составлять 0,3—0,8, а для вакуум-плотных швов — не менее 0,5.

Основными параметрами лазерной сварки являются энергия лазерного излучения, длительность и частота следования импульсов, диаметр светового пятна на свариваемой поверхности.

К достоинствам лазерной сварки относят возможность сварки металлов трудносвариваемых или не поддающихся сварке другими методами; малые размеры зоны термического влияния и структурных изменений, что позволяет выполнять сварные швы в непосредственной близости от металлостеклянных спаев; возможность сварки практически в любых средах; минимальные деформации свариваемых деталей; высокий процент выхода годных изделий по герметичности (до 99 %).

К недостаткам лазерной сварки следует отнести незначительную глубину проплавления соединяемых металлов при средних мощностях излучения; выплески испаряемого металла при использовании мощных лазеров; необходимость удаления образующихся ядовитых газов и ионизированных паров свариваемых металлов; высокие требования к точности изготовления деталей корпусов; низкую производительность.

Герметизация корпусов шовной контактной (роликовой) сваркой. Односторонняя шовная контактная (роликовая) сварка — наиболее распространенный способ герметизации микросхем в металлостеклянных и металлокерамических корпусах прямоугольной и квадратной формы.

Процесс сварки происходит при перемещении двух конических роликов, свободно зращающихся на полуосях по противоположным кромкам

крышки (рис. 7.51). Ролики с определенным усилием прижимаются к кромкам крышки и вращаются за счет сил трения. При подаче сварочных импульсов от источника питания происходит выделение тепла в зоне контакта сварочных роликов с кромкой крышки. Сварное соединение осуществляется расплавлением покрытий крышки и основания корпуса и образования наплыва, т. е. расплавленного металла, выдавленного в зоне стыка деталей. При этом сварной шов получают в результате перекрытия сварных точек, образующихся при контакте сварных роликов с крышкой корпуса. Для получения герметичных сварных швов коэффициент перекрытия сварных точек должен составлять 0,5—0,8.

Основными параметрами шовной контактной (роликовой) сварки являются амплитуда сварочного напряжения, длительность сварочного импульса, частота следования сварочных импульсов, усилие на сварочных роликах.

К достоинствам герметизации шовной контактной (роликовой) сварки относят высокую прочность и надежность сварного шва, высокую герметичность, большой процент выхода годных (до 99 %); незначительный разогрев корпуса, высокую производительность.

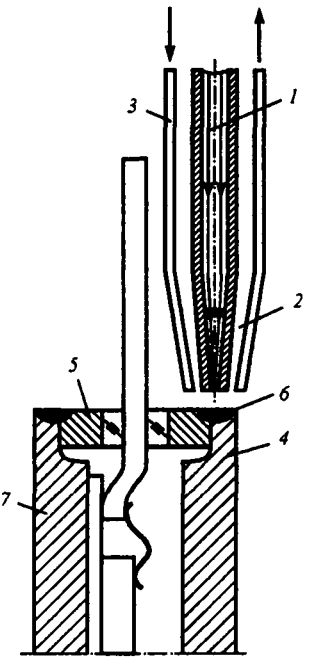


Рис. 7.50. Герметизация лучом лазера:

1 — лазерный луч; *2* — отсос продуктов горения; *3* — подача инертного газа; *4* — верхняя крышка корпуса; *5* — основание корпуса; *6* — сварное соединение; *7* — нижняя крышка корпуса

К недостаткам шовной контактной (роликовой) сварки следует отнести низкую стойкость электродов, высокие механические напряжения в зоне контакта роликов с крышкой, нестабильность размеров сварного шва, приводящую к непровару или перегреву корпуса, возможность возникновения начального выплеска при сварке, приводящую к быстрому износу сварочных роликов и браку приборов.

Контроль герметичности

Качество герметизации корпусов оценивают наличием дефектов визуально и наличием течей. В качестве единицы измерения используют течь, при которой за 1 с в объеме 1 л, где создан вакуум, давление возрастает на 1 мкм рт. ст. Загерметизированные приборы контролируют на наличие малых и больших течей. Для контроля малых течей чаще всего применяют масс-

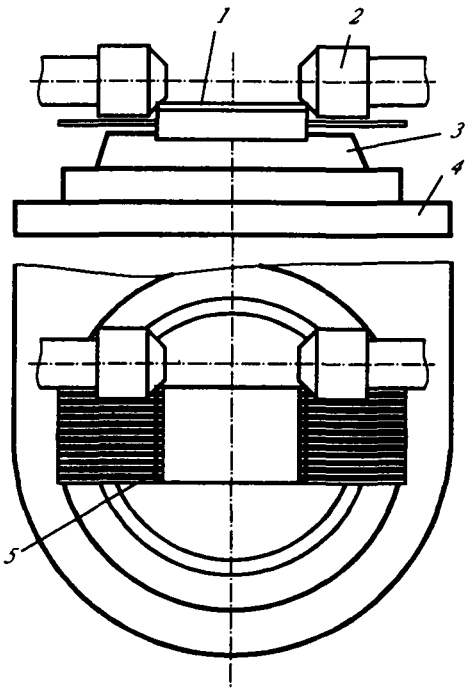


Рис. 7.51. Схема установки герметизации шовной контактной сваркой:

1 — корпус микросхемы; *2* — прижимной ролик; *3* — технологическая оснастка; *4* — монтажный стол; *5* — сварное соединение

спектрометрический метод и метод с использованием электроотрицательного газа. Масс-спектрометрический метод контроля герметичности МС широко распространен, так как обладает высокой чувствительностью и надежностью. Он основан на разделении молекул сложной парогазовой смеси по массам и измерении ионного тока ионизированных молекул какой-либо определенной массы. В качестве контрольного газа обычно используют гелий, так как он обладает высокой проникающей способностью; малым содержанием в атмосфере, что дает незначительный фоновый уровень при измерениях; масс-спектрометрический пик гелия резко отличается от пиков газов, содержащихся в атмосфере; гелий при попадании в прибор не оказывает влияния на структуру и работоспособность устройства. Контролируемые МС опрессовывают в камере опрессовки в атмосфере гелия под давлением 400 кПа в течение 4...6 ч. Затем их помещают в камеру, где создается вакуум. Если в процессе опрессовки гелий проник через течи в корпус, то его утечка в вакууме обнаруживается течеискателем, и прибор отбраковывается. К недостаткам масс-спектрометрического метода контроля герметичности следует отнести низкую производительность; сложность обслуживания оборудования; необходимость создания высокого вакуума; высокую квалификацию специалистов; невозможность контролировать большие течи, так как при наличии в корпусе больших течей гелий выходит через них до контроля герметичности.

Для контроля герметичности по большим течам чаще всего используют вакуумно-жидкостной или пузырьковый методы. Вакумно-жидкостной метод основан на визуальном наблюдении выходящих через течи пузырьков воздуха. В этом случае МС помещают в специальную жидкость (уайт-спирит), над которой создают вакуум. Вследствие перепада давления воздух из негерметичного корпуса МС будет выходить через течи в виде непрерывной цепочки пузырей.

При контроле герметичности на большие течи пузырьковым методом контролируемые МС помещают в жидкость (этиленгликоль), нагретую до температуры порядка 120...140 °С. Течь определяют также по наличию непрерывной цепочки пузырей.

Контрольные вопросы

1. Что означает технологическая совместимость элементов полупроводниковой МС и в чем заключается выигрыш для производства?
2. Какие операции включает цикл избирательного легирования кремния?
3. Какие условия необходимо обеспечить при легировании, чтобы возник *p-n*-переход?
4. Чем обусловлено проникновение атомов легирующей примеси в кристаллическую решетку в случае термической диффузии и в случае ионной имплантации?
5. Почему диффузионные области n^+ и p^+ целесообразно формировать в одностадийном процессе?
6. Чем определяется величина пробивного напряжения плавного и ступенчатого *p-n*-переходов?
7. Почему не вся примесь, внедренная в кристаллическую решетку, определяет электропроводность слоя?
8. Назовите этапы процесса фотолитографии.
9. Какие факторы определяют точность взаимного положения различных топологических слоев?
10. За счет чего создается атомарный поток вещества на подложку в случае термического вакуумного напыления и в случае распыления ионной бомбардировкой?
11. Какие факторы ограничивают минимальные размеры тонкопленочных интегральных резисторов?
12. Какие операции включает цикл формирования слоя тонкопленочных элементов?
13. Перечислите особенности конструкции коммутационных плат для микросборок.
14. Какими способами можно закрепить подложку в корпусе МС (микросборки) и кристалл на подложке или в корпусе?
15. Перечислите варианты электрического монтажа кристаллов МС на подложках (в корпусах).
16. Какие виды герметизации МС применяются в микроэлектронике?
17. Какими способами герметизируют корпуса МС?
18. Как контролируют герметичность МС по малым и большим течам?

8. ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ

8.1. Общие сведения о печатных платах

Печатные платы (ПП) — основа *печатного монтажа* любой ЭА, при котором МС, полупроводниковые приборы, ЭРЭ и элементы коммутации устанавливаются на изоляционное основание с системой токопроводящих полосок металла (проводников), которыми они электрически соединяются между собой в соответствии с электрической принципиальной схемой. Практически нет такой аппаратуры, где бы не использовались ПП какого-либо типа.

Печатный монтаж — способ монтажа, при котором электрическое соединение элементов электронного узла, включая экраны, выполнено с помощью печатных проводников. **Печатный проводник** — проводящая полоска в проводящем рисунке.

В ЭА ПП применяют практически на всех уровнях конструктивной иерархии: на нулевом — в качестве основания гибридных схем и микросборок, на первом и последующих — в качестве основания, механически и электрически объединяющего все элементы, входящие в схему электрическую принципиальную ЭА и ее узлов. На рис. 8.1 в качестве примера приведен общий вид ПП одного из узлов ЭА.

Государственным стандартом предусмотрены следующие типы ПП (рис. 8.2):

односторонняя печатная плата (ОПП) — ПП, на одной стороне которой выполнен проводящий рисунок (рис. 8.2, *а*);

двусторонняя печатная плата (ДПП) — ПП, на обеих сторонах которой выполнены проводящие рисунки и все требуемые соединения (рис. 8.2, *б*);

многослойная печатная плата (МПП) — ПП, состоящая из чередующихся слоев изоляционного материала с проводящими рисунками на двух или более слоях, между которыми выполнены требуемые соединения (рис. 8.2, *в*);

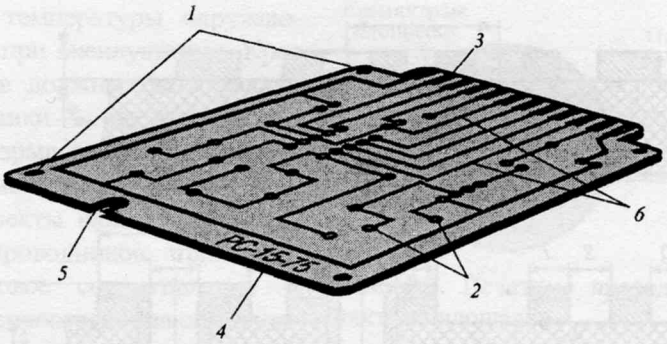


Рис. 8.1. Печатная плата узла ЭВМ:

1 — крепежные отверстия; *2* — монтажные отверстия; *3* — концевые печатные контакты; *4* — маркировка печатной платы; *5* — ориентирующий паз; *6* — печатные проводники

гибкая печатная плата (ГПП) — ПП, имеющая гибкое основание;

гибкий печатный кабель (ГПК) — система параллельных печатных проводников, размещенных на гибком основании (рис. 8.2, *г*).

На рис. 8.2 использованы следующие обозначения: t — ширина печатного проводника; S — расстояние между печатными проводниками; Q — расстояние от края ПП (выреза, паза) до элементов проводящего рисунка; b — расстояние от края просверленного отверстия до края контактной площадки (поясок); D — диаметр контактной площадки; d — диаметр отверстия; $h_ф$ — толщина фольги; $H_м$ — толщина материала основания печатной платы; $H_п$ — толщина ПП; l — расстояние между центрами (осями) элементов конструкции ПП.

Проводящий рисунок — совокупность всех элементов на отдельном слое ПП, образованных проводящим материалом (печатные проводники, контактные площадки, концевые контакты печатного разъема и др.).

Конструктивные характеристики печатных плат

По точности выполнения печатных элементов конструкции (проводников, контактных площадок и пр.) все ПП делят на *пять классов* (табл. 8.1): отличающиеся наименьшим номинальным размером в *узком месте* — участок ПП, где элементы печатного проводящего рисунка и расстояния между ними должны быть выполнены только с минимально допустимыми значениями; 1-й и 2-й классы ПП применяют в случае малой насыщенности поверхности ПП дискретными элементами и микросхемами малой степени интеграции; 3-й класс ПП — для микросхем со штыревы-

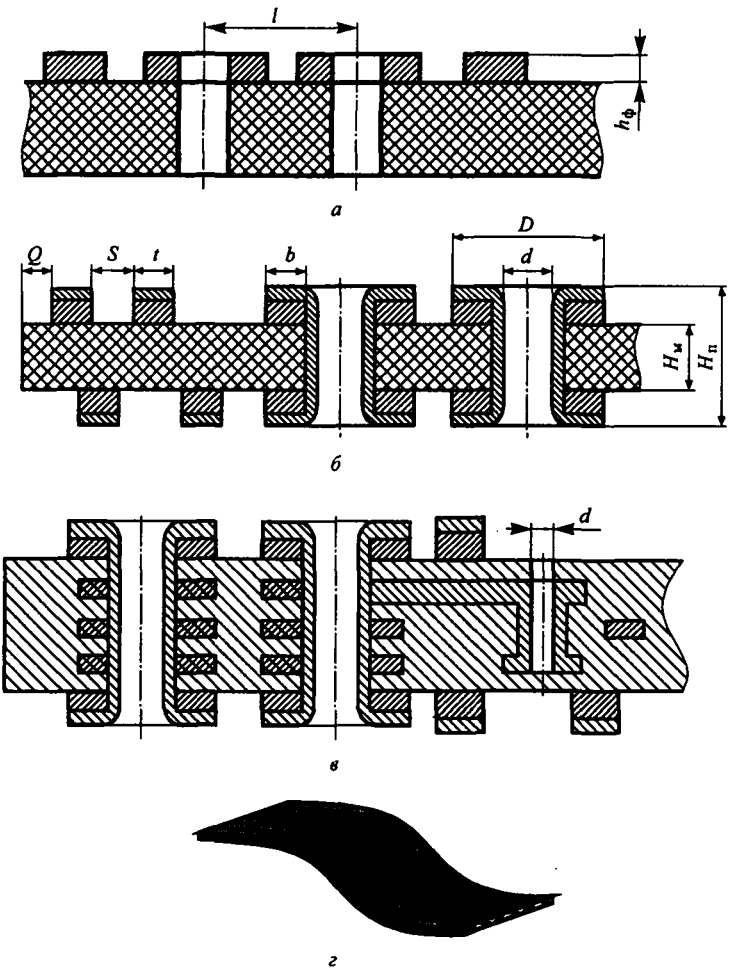


Рис. 8.2. Типы печатных плат:

а — односторонняя ПП; *б* — двусторонняя ПП; *в* — многослойная ПП; *г* — гибкий печатный кабель

ми и планарными выводами при средней и высокой насыщенности поверхности ПП элементами; 4-й класс ПП — при высокой насыщенности поверхности ПП микросхемами с выводами и без них; 5-й класс ПП — при очень высокой насыщенности поверхности ПП элементами с выводами и без них. Для поверхностного монтажа элементов используют в основном 4-й и 5-й классы ПП.

Ширину печатных проводников (рис. 8.3) рассчитывают и выбирают в зависимости от допустимой токовой нагрузки, свойств токопроводящего

материала, температуры окружающей среды при эксплуатации. Края проводников должны быть ровными, проводники — без вздутий, отслоений, разрывов, протравов, пор, крупнозернистости и трещин, так как эти дефекты влияют на сопротивление проводников, плотность тока, волновое сопротивление и скорость распространения сигналов.

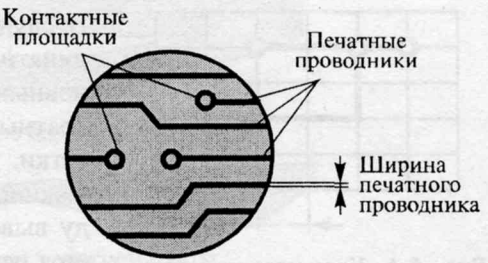


Рис. 8.3. Печатные проводники и контактные площадки

Таблица 8.1. **Наименьшие номинальные значения основных размеров элементов печатного монтажа для узкого места в зависимости от классов точности**

Условные обозначения элементов печатного монтажа	Класс точности ПП				
	1	2	3	4	5
t, мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
s, мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
b, мм	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025
$\gamma = d/H$	0,40	0,40	0,33	0,25	0,20
Δt, мм (без покрытия)	±0,15	±0,10	±0,05	±0,03	0; –0,03
Δt, мм (с покрытием)	+0,25; –0,20	+0,15; –0,10	±0,10	±0,05	±0,03
T_1, мм (ОПП, ДПП, ГПК и МПП — наружные слои)	0,15	0,10	0,05	0,03	0,03
T_1, мм (МПП — внутренние слои)	0,20	0,12	0,10	0,05	0,03

Примечание. Δt — предельное отклонение ширины проводника; T_1 — позиционный допуск расположения печатного проводника.

Расстояние между элементами проводящего рисунка (например, между проводниками), расположенными на наружных или в соседних слоях ПП, зависит от допустимого рабочего напряжения, свойств диэлектрика, условий эксплуатации и связано с помехоустойчивостью, искажением сигналов и короткими замыканиями.

Координатная сетка чертежа ПП необходима для координации элементов печатного рисунка. В узлах пересечений сетки располагаются *монтажные* и *переходные отверстия* (рис. 8.4). Основным шагом координатной сетки принят размер 0,5 мм в обоих направлениях. Если этот шаг не удовлетворяет требованиям конкретной конструкции, можно применять шаг, равный 0,05 мм. При использовании микросхем и элементов с шагом выводов 0,625 мм допускается применение шага координатной сетки 0,625 мм.

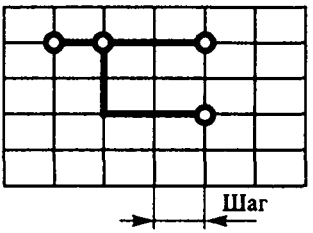


Рис. 8.4. Координатная сетка чертежа печатной платы

В случае необходимости применения координатной сетки с шагом, отличным от основных, предпочтительным является шаг, кратный основным шагам координатной сетки. При использовании микросхем зарубежного производства с расстояниями между выводами по дюймовой системе допускается использование шага координатной сетки, кратного 2,54 мм.

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

Размеры ПП, если они специально не оговорены в ТЗ, определяются с учетом количества устанавливаемых элементов, их установочных площадей, шага установки, зон установки разъема и пр. Линейные размеры ПП рекомендуется выбирать по ГОСТу (табл. 8.2). Соотношение линейных размеров сторон ПП должно составлять не более 3:1.

Кривизна ПП (цилиндрическое или сферическое искривление основания) может появиться в результате воздействия высокой температуры и влажности (рис. 8.5). Допустимое значение изгиба ПП *К* на длине 100 мм составляет для ОПП и ДПП 1,5 мм; для МПП — 2,0 мм.

Таблица 8.2. **Линейные размеры ПП**

Ширина, мм	Длина, мм	Ширина, мм	Длина, мм	Ширина, мм	Длина, мм	Ширина, мм	Длина, мм
20	30	60	90	100	120	140	150
	40		100		130		200
30	40		140	110	150	150	150
			160		170		170
40	60	75	75	120	120		180
45	75		90		140		200
	80		170		150	160	170
50	60	80	130		160		200
	80		140		170	170	180
	100	90	90		180		200
	150		120		200		280
60	60		150	130	200	200	360
	80		170				

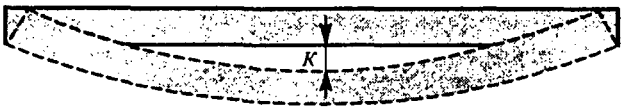


Рис. 8.5. Изгиб печатной платы



Рис. 8.6. Скручивание печатной платы

Коробление ПП (спиральное искривление противоположных кромок основания ПП, скручивание) может привести к разрыву проводников, осложняет процесс изготовления ПП и установки элементов при сборке модуля (рис. 8.6).

Электрические характеристики печатных плат

Допустимая плотность тока для ОПП, ДПП и наружных слоев МПП — 20 А/мм^2; для внутренних слоев МПП — 15 А/мм^2. *Допустимое рабочее напряжение* между элементами проводящего рисунка, расположенными в соседних слоях ПП и ГПК, зависит от материала основания печатной платы и не должно превышать следующих значений (табл. 8.3).

Таблица 8.3. **Допустимые рабочие напряжения между элементами проводящего рисунка, расположенными в соседних слоях**

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

Допустимые рабочие напряжения между элементами проводящего рисунка, расположенными на наружном слое ПП, зависят от материала основания ПП, условий эксплуатации и не должны превышать следующих значений (табл. 8.4).

Таблица 8.4. **Допустимые рабочие напряжения между элементами проводящего рисунка на наружных слоях ПП**

Расстояние между элементами проводящего рисунка, мм	Значения рабочего напряжения, В							
	Нормальные условия		Относительная влажность (93±3)% при 40±2 °С в течение 48 ч		Пониженное атмосферное давление			
					53600 Па (400 мм рт. ст.)		666 Па (5 мм рт. ст.)	
	ГФ	СФ	ГФ	СФ	ГФ	СФ	ГФ	СФ
От 0,1 до 0,2	—	25	—	15	—	20	—	10
От 0,2 до 0,3	30	50	20	30	25	40	20	30
От 0,3 до 0,4	100	150	50	100	80	110	30	50
От 0,4 до 0,7	150	300	100	200	110	160	58	80
От 0,7 до 1,2	300	400	230	300	160	200	80	100
От 1,2 до 2,0	400	600	300	360	200	300	100	130
От 2,0 до 3,5	500	830	360	430	250	400	110	160
От 3,5 до 5,0	660	1160	500	600	330	560	150	210
От 5,0 до 7,5	1000	1500	660	830	500	660	200	250
От 7,5 до 10,0	1300	2000	830	1160	560	1000	230	300
От 10,0 до 15,0	1800	2300	1160	1600	660	1160	300	330

Все типы ПП должны обеспечивать работоспособность при воздействии на них климатических факторов одной из следующих групп жесткости (табл. 8.5).

Таблица 8.5. **Допустимые значения воздействующего фактора по группам жесткости**

Воздействующий фактор	Группы жесткости			
	1	2	3	4
Температура, К	Верхнее значение			
	328	358	373	393
	Нижнее значение			
	248	233	213	
Относительная влажность, %	При температуре до 308 К		При температуре до 313 К	
	75	98	98	
Перепад температур, К	248…328	233…358	213…373	213…393
Атм. давление Па (мм рт. ст.)	Нормальное	53600 (400)		666 (5)

Контактные площадки ПП с металлизированными отверстиями должны выдерживать не менее 4 (МПП — 3) циклов перепаек; без металлизированных отверстий — не менее 3 (МПП — 2) перепаек.

8.2. Материал печатных плат

В качестве *основания печатных плат* используют фольгированные и нефольгированные диэлектрики (гетинакс, текстолит, стеклотекстолит, стеклоткань, лавсан, полиимид, фторопласт и др.), керамические материалы и металлические пластины. При выборе материала основания ПП необходимо обратить внимание на следующее: предполагаемые механические воздействия (вибрации, удары, линейное ускорение и т. п.); класс точности ПП (расстояние между проводниками); реализуемые электрические функции; быстродействие; условия эксплуатации; стоимость.

В табл. 8.6, 8.7 и 8.8 представлены материалы основания ПП, наиболее часто используемые в настоящее время для изготовления ОПП, ДПП, МПП, ГПП и ГПК.

По сравнению с гетинаксами стеклотекстолиты имеют лучшие механические и электрические характеристики, более высокую нагревостойкость, меньшее влагопоглощение. Однако у них есть ряд недостатков: невысокая нагревостойкость по сравнению с полиимидами, что способствует загрязнению смолой торцов внутренних слоев при сверлении отверстий; худшая механическая обрабатываемость; более высокая стоимость; существенное различие (примерно в 10 раз) коэффициента теплового расширения меди и стеклотекстолита в направлении толщины материала, что может привести к разрыву металлизации в отверстиях при пайке или в процессе эксплуатации.

Для изготовления ПП, обеспечивающих надежную передачу наносекундных импульсов, необходимо применять материалы с улучшенными диэлектрическими свойствами (уменьшенным значением диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь). Поэтому к перспективным относится применение оснований ПП из органических материалов с относительной диэлектрической проницаемостью ниже 3,5.

Для изготовления ПП, эксплуатируемых в условиях повышенной опасности возгорания, применяют огнестойкие гетинаксы и стеклотекстолиты марок СОНФ, СТНФ, СФВН, СТФ, СОНФ-у.

Для изготовления ГПК, выдерживающих многократные (до 150) изгибы на 90° (в обе стороны от исходного положения) с радиусом 3 мм, применяют фольгированный лавсан и фторопласт. Материалы с толщиной фольги 5 мкм позволяют изготовить ПП 4-го и 5-го классов точности.

Таблица 8.6. **Материалы ОПП и ДПП**

Материал	Марка	Толщина, мм	Материал	Марка	Толщина, мм
Гетинакс фольгированный	ГФ-1-35	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	Диэлектрик фольгированный общего назначения с гальваностойкой фольгой	ДФО-1 ДФО-2 (фольга 35 мкм)	0,06; 0,08; 0,1; 0,13; 0,15; 0,20; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0
Гетинакс фольгированный с гальваностойкой фольгой	ГФ-1-35Г ГФ-2-35Г ГФ-1-50Г ГФ-2-50Г		Диэлектрик фольгированный самозатухающий с гальваностойкой фольгой	ДФС-1 ДФС-2 (фольга 20 мкм)	
Стеклотекстолит фольгированный	СФ-1-35 СФ-2-35 СФ-1-50 СФ-2-50	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	Стеклотекстолит фольгированный с повышенной нагревостойкостью	СФПН-1-50 СФПН-2-50	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
То же с гальваностойкой фольгой			Стеклотекстолит фольгированный общего назначения	СОНФ-1 СОНФ-2	—
Стеклотекстолит теплостойкий фольгированный с гальваностойкой фольгой	СТФ-1-35 СТФ-2-35 СТФ-1-18 СТФ-2-18	0,08; 0,1; 0,13; 0,2; 0,15; 0,3; 0,25; 0,5; 0,35; 0,8; 1,5; 2,5; 1; 2; 3	Гетинакс фольгированный общего назначения	ГОФ-1-35Г ГОФ-2-35Г	—
			Стеклотекстолит с двусторонним адгезионным слоем	СТЭК	1,0; 1,5
Стеклотекстолит теплостойкий и негорючий фольгированный с гальваностойкой фольгой	СТНФ-1-35 СТНФ-2-35 СТНФ-1-18 СТНФ-2-18		Стеклотекстолит теплостойкий, армированный алюминиевым протектором	СТПА-5-1 СТПА-5-2 (фольга 5 мкм)	0,1; 0,12; 0,13; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0
Стеклотекстолит листовой	СТЭФ-1-2ЛК	1; 2	Стеклотекстолит с катализатором	СТАМ	0,7—2,0
Стеклотекстолит электротехнический	СТЭФ-ВК-1-1,5		Фольгированный армированный фторопласт	ФАФ-4 (фольга 35 мкм)	—
Стеклотестолит фольгированный теплостойкий	СТФТ	—	Стеклотекстолит теплостойкий	СТАП (фольга 5,18, 35, 50, 70 и 100 мкм на медном или алюминиевом протекторе)	—

Таблица 8.7. **Материалы МПП**

Материал	Марка	Толщина, мм
Фольгированный травящийся стеклотекстолит (гальваностойкая фольга)	ФТС-1-18А ФТС-2-18А ФТС-1-35А ФТС–2-35А ФТС-2-35-Б	0,1; 0,12; 0,14; 0,15; 0,18; 0,19; 0,23; 0,27; 0,5
Фольгированный диэлектрик для микроэлектронной аппаратуры	ФДМЭ-1А ФДМЭ-2А ФДМЭ-2Б	0,1; 0,13; 0,16; 0,20
Диэлектрик фольгированный тонкий	ФДМ-1А ФДМ-2А ФДМ-2Б	0,15; 0,20; 0,23; 0,25; 0,30; 0,35
Стеклотекстолит теплостойкий фольгированный	СТФ-1-35 СТФ-2-35 СТФ-1-18	0,08; 0,1; 0,13; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,5; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
Диэлектрик фольгированный общего назначения	ДФО-1 ДФО-2 (фольга 35 мкм)	0,06; 0,08; 0,1; 0,13; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5; 0,8; 1,5; 2,0
Диэлектрик фольгированный самозатухающий	ДФС-1 ДФС-2 (фольга 20 мкм)	
Стеклотекстолит теплостойкий негорючий фольгированный	СТНФ-1-35 СТНФ-2-35 СТНФ-1-18	0,08; 0,1; 0,13; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,5; 0,8; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
Стеклотекстолит теплостойкий, армированный алюминиевым протектором	СТПА-5-1 СТПА-5-2 (фольга 5 мкм)	0,1; 0,12; 0,13; 0,15; 0,2; 0,25
Полиимид фольгированный	ПФ-1 (фольга 35 мкм)	0,05; 0,1
Стеклоткань прокладочная	СП-4-0,025 СП-4-0,06 СП-4-0,1	0,025; 0,06; 0,1
Стеклоткань прокладочная травящаяся	СПТ-3-0,025 СПТ-3-0,06 СПТ-3-0,1	
Стеклотекстолит фольгированный с повышенной нагревостойкостью	СФВН	

В производстве ПП широко используют отечественные и импортные материалы. Прежде чем останавливать свой выбор на том или ином материале, следует иметь в виду, что:

при использовании недорогих отечественных стеклотекстолитов при ширине проводников и зазоров между ними менее 0,3 мм большой процент ПП уйдет в брак, что, естественно, увеличит стоимость ПП и приблизит к стоимости ПП на импортных материалах;

Таблица 8.8. **Материалы ГПП и ГПК**

Материал	Марка	Толщина, мм
Лавсан фольгированный	ЛФ-1, (фольга 35; 50 мкм)	0,05; 0,1
Полиимид фольгированный	ПФ-1 ПФ-2	
Диэлектрик фольгированный тонкий	ФДМ-1А ФДМ-2А ФДМ-1Б ФДМ-2Б	0,1; 0,13; 0,16; 0,2
Фольгированный диэлектрик для микроэлектронной аппаратуры	ФДМЭ-1А (1Б) ФДМЭ-2А (2Б)	0,15; 0,20; 0,23; 0,30
Фольгированный армированный фторопласт	ФАФ-4Д	—
Стеклотекстолит теплостойкий с алюминиевым протектором	СТПА-5-1 СТПА-5-2	0,1; 0,12; 0,15; 0,2; 0,25
Стеклоткань с эпоксидной пропиткой	СПТ-3	0,025; 0,1
Лавсан фольгированный	ЛФР	—

при изготовлении ДПП отечественные материалы целесообразно применять, если нет повышенных требований по климатическим воздействиям и частотным характеристикам;

если стоимость модуля 1-го уровня (ячейки) превышает стоимость ПП примерно в 10 раз, желательно использовать импортные материалы;

подготовка производства ПП на импортных материалах в 2—2,4 раза дороже чем на отечественных, а изготовление 1 дм^2 — в 1,8—2,2 раза и зависит от объема заказа в дм^2 или типа производства и наличия-отсутствия защитной паяльной маски;

применение защитных паяльных масок увеличивает стоимость ПП на отечественных материалах примерно на 30...35 %, а на импортных — на 5 %.

Из зарубежных материалов отметим следующие:

стеклотекстолит фольгированный марки Duraver-E-Cu (FR-4, FR-2, CEM-1 и др.) фирм «Isola AG» (Германия), «MC Electronic» (Австрия) односторонний и двусторонний; размер листа 1070x1225мм; толщина листа от 0,05 до 1,5 мм; толщина фольги — 18; 35; 50; 70 и 105 мкм; огнестойкий;

стеклотефлоновые материалы Duroid «Rogers», TL «Taconics», Ultralam «Arlon» и др.;

материалы электроизоляционные фольгированные и нефольгированные завода «Молдавизолит» (Молдавия):

МИ 1222 (односторонний) и МИ 2222 (двусторонний); размер листа 1020x1220 мм; толщина листа от 0,8 до 3,2 мм; толщина фольги — 18; 35; 50; 70 и 105 мкм; (тип FR-4); огнестойкий;

МИ 1222.8 и МИ 2222.8; толщина листа от 0,06 до 0,8 мм (тип FR-4), огнестойкий;
МИ 1112А, МИ 1112В, МИ 2112А и МИ2112В (тип FR-2), огнестойкий;
МИ 1272 и 2272 (тип СЕМ-1),огнестойкий;
Прокладка склеивающая нормированной горючести марки ТирасЛам МИ 6222 (тип В).

Все материалы завода «Молдавизолит» сертифицированы на безопасность потребителя и окружающей среды в системе сертификации «Underwriters Laboratories» (UL) США и Госстандарта Российской Федерации.

8.3. Изготовление оригиналов и фотошаблонов

Оригиналы и фотошаблоны являются важнейшим инструментом при изготовлении печатного рисунка всех типов плат. *Оригиналом* рисунка ПП называют изображение рисунка ПП, выполненное с необходимой точностью в заданном масштабе. *Фотошаблоном* (ФШ) рисунка ПП называют пластину (из стекла или полимера) с прозрачными и непрозрачными для оптического излучения участками. Фотошаблон — основной инструмент для получения рисунка на поверхности печатной платы или отдельного ее слоя. Пример фотошаблона приведен на рис. 8.7.

Комплектом фотошаблонов называют то количество фотошаблонов, совмещающихся между собой, которое необходимо и достаточно для изготовления ПП определенного типа и наименования.

Оригинал рисунка ПП служит исходным документом для получения *эталонных* и *рабочих фотошаблонов*, необходимых для создания рисунка токопроводящих участков на ПП. Основной проблемой при производстве фотошаблонов (эталонных и рабочих) является обеспечение точности и метрической стабильности основных размеров рисунка под воздействием внешних факторов.

Основные критерии оценки качества рабочего фотошаблона — отсутствие фотографической вуали; достаточная плотность черного фона; высокая резкость края изображения.

При изготовлении фотошаблонов одной из ответственнейших операций

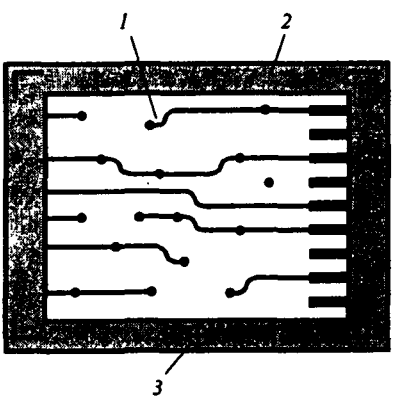


Рис. 8.7. Фотошаблон:
1 — рабочая зона; *2* — технологическое поле; *3* — контрольный знак

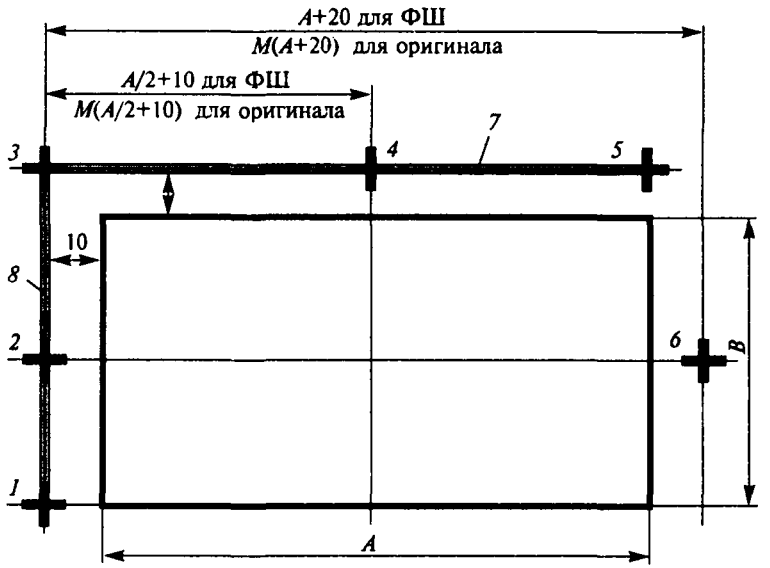


Рис. 8.8. Схема расположения контрольных знаков:

A, *B* — размеры сторон ПП; *M* — масштаб оригинала ПП; *7*, *8* — контрольные знаки в виде линии шириной 0,2 мм

является операция размещения контрольных знаков. *Контрольный знак* — специальный топологический элемент в виде штриха, щели, креста и пр., служащий для контроля точности изготовления оригиналов и фотошаблонов и применяемый для совмещения фотошаблонов слоев двусторонних и многослойных ПП, а также при выполнении операции *мультипликации*. Пример схемы расположения контрольных знаков на оригиналах (О) и фотошаблонах ПП приведен на рис. 8.8.

Контрольные знаки в виде креста *1*, *3*, *5* предназначены для контроля точности изготовления оригинала и ФШ и для совмещения ФШ с ПП; кресты *2*, *4*, *6* — для установки эталонного ФШ в процессе изготовления группового ФШ ПП на фотографической пластине с фиксирующими отверстиями.

При изготовлении рабочих ФШ необходимо, чтобы размеры элементов топологии ФШ и расстояния между ними соответствовали требованиям КД на ПП с учетом технологических допусков на изготовление ПП. Предельные отклонения размеров элементов топологии ФШ в зависимости от класса точности ПП приведены в табл. 8.9.

Таблица 8.9. **Предельные отклонения размеров элементов топологии ФШ**

Класс точности ПП	1	2	3	4	5
Предельные отклонения размеров элементов топологии ФШ, мм	± 0,10	± 0,05	± 0,03	± 0,02	± 0,01

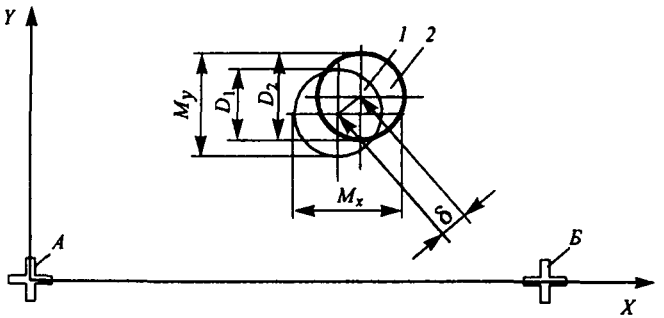


Рис. 8.9. Несовпадение центров контактных площадок фотошаблонов

Качество совмещения комплекта ФШ определяют величиной несовмещения по контактным площадкам:

$$\delta = \sqrt{\left[M_x - \frac{1}{2}(D_1 + D_2)\right]^2 + \left[M_y - \frac{1}{2}(D_1 + D_2)\right]^2},$$

где δ, M_i, D_i см. рис. 8.9.

Для ПП всех классов точности несовмещение δ не должно превышать следующих значений:

Таблица 8.10. **Значения несовмещений по контактным площадкам**

Класс точности ПП	1	2	3	4	5
Значение несовмещения комплекта ФШ, δ, мм	0,02…0,15	0,15…0,10	0,10…0,07	0,075…0,050	0,05…0,03

Ширину технологического поля, расположенного по контуру рабочей зоны рабочего ФШ, обычно выбирают в пределах 30 мм.

Оригиналы ПП ранее изготавливали вручную методом аппликации печатных элементов на основание оригинала; на фотокоординатографах; методом вырезания по контуру пленки, нанесенной на стеклянное основание, методом вырезания и гравирования линий на пленке, покрытой эмалью, и методом вычерчивания на бумаге пишущим инструментом с тушью или чернилами. Масштаб оригинала может быть 1:1, 5:1, 10:1. После изготовления и контроля оригинал помещали в установку экспонирования, где с него контактным или проекционным методом получали скрытое изображение топологии ПП.

В качестве фотоматериалов применяют фотографические пластинки; фототехнические пленки; диазоматериалы (диазопластинки и диазопленки), чувствительные к ультрафиолетовому излучению; бессеребряные светочувствительные материалы. Время экспонирования выбирают опытным путем в зависимости от светочувствительности фотоматериала, освещенности источника светового излучения, спектральной чувствительности диазоматериалов, спектра источника излучения.

Для получения *группового фотошаблона*, на котором выполняют рисунок топологии двух и более ПП, применяют операцию *мультиплицирования* — повторение экспонирования рисунка оригинала на всей поверхности фотоматериала.

После экспонирования и мультиплицирования осуществляется *химико-фотографическая обработка* фотоматериала, контроль полученного фотошаблона, *ретуширование* — удаление дефектов.

Широко распространен метод получения фотошаблонов на лазерных растровых генераторах изображений (фотоплоттерах) сканированием лазерного пятна по поверхности пленок или стеклянных пластин и испарением маскирующего покрытия или засветки фотоматериала в соответствии с рисунком ПП. Программу перемещения лазерного пятна получают при проектировании (трассировке) ПП по программе. В фотоплоттере имеется библиотека часто повторяющихся в топологических чертежах элементов и узлов, использование которых значительно облегчает изготовление фотошаблонов. Лазерная система фотоплоттера, содержащая лазер, акустооптический генератор, многогранную призму и фокусирующий объектив, формирует лазерное пятно постоянного размера, которое сканирует по рабочему полю заготовки.

При изготовлении крупноформатных шаблонов ПП на стеклах с маскирующим покрытием методом лазерного гравирования погрешность взаимного расположения рисунка составляет ±0,01 мм, точность позиционирования — ±0,005 мм, точность повторного позиционирования — ±0,002 мм, неровность края изображения — ±0,01 мм, погрешность воспроизведения размеров элементов изображения — ±0,015 мм, погрешность расположения элементов относительно базового отверстия — ±0,015 мм.

Формирование растрового изображения рисунка (оригинала) в фотоплоттере вне зависимости от сложности рисунка происходит с высокой скоростью в течение нескольких минут. Тиражирование ФШ проводится без использования методов контактной печати с высокой точностью. Работа фотоплоттеров поддерживается входными и выходными форматами Gerber; PLT (САПР PCAD); BRD (САПР МПП); Autocad. Это позволяет:

получать фотошаблоны и программы сверления, представленные в различных форматах;

получать фотошаблоны и программы сверления с цифрового планшета;

просматривать и редактировать ФШ и программы сверления;

создавать панели (групповые заготовки на основе контура ПП одновременно для всех слоев с использованием мультипликации, слияния, сдвига, поворота, зеркала, масштабирования и пр.);

автоматически генерировать по ФШ программы сверления;

выводить оптимизированные ФШ и программы сверления в различных выходных форматах;

делать бумажные копии ФШ и программ сверления;

подсчитывать площадь металлизации, число контактных площадок проводников, отверстий, длину проводников и пр.

Время изготовления ФШ, например, размером 550×550 мм с минимальной толщиной линии 0,15 мм и неровностью края экспонируемого элемента ±10 мкм составляет 5...6 мин.

Изготовленные фотошаблоны используют для получения рисунков топологии ПП контактной печатью. Количество полученных отпечатков для различных типов фотошаблонов различно: для эмульсионных ФШ — 50 операций контактной печати; для диазотипных ФШ — 100 операций контактной печати; для эмульсионных стеклянных ФШ с фиксирующими отверстиями с защитной пленкой при однократном нанесении — 300 операций контактной печати.

8.4. Технологические процессы изготовления печатных плат

Для изготовления элементов проводящего рисунка ПП применяются две технологии: субтрактивная и аддитивная (рис. 8.10). *Субтрактивный процесс* — получение проводящих рисунков путем избирательного травления участков фольги с пробельных мест. *Аддитивный процесс* — получение проводящего рисунка путем избирательного осаждения проводникового материала на нефольгированный материал основания.

Односторонние печатные платы (ОПП), отличающиеся простотой и низкой стоимостью изготовления, изготавливаются по 1-, 2- и 3-му классам точности. Технологическое ограничение ширины проводников в таких платах составляет 0,25 мм, отверстий — 0,8 мм. Основными технологическими процессами изготовления таких плат являются химический негативный (табл. 8.11) и химический позитивный (табл. 8.12).

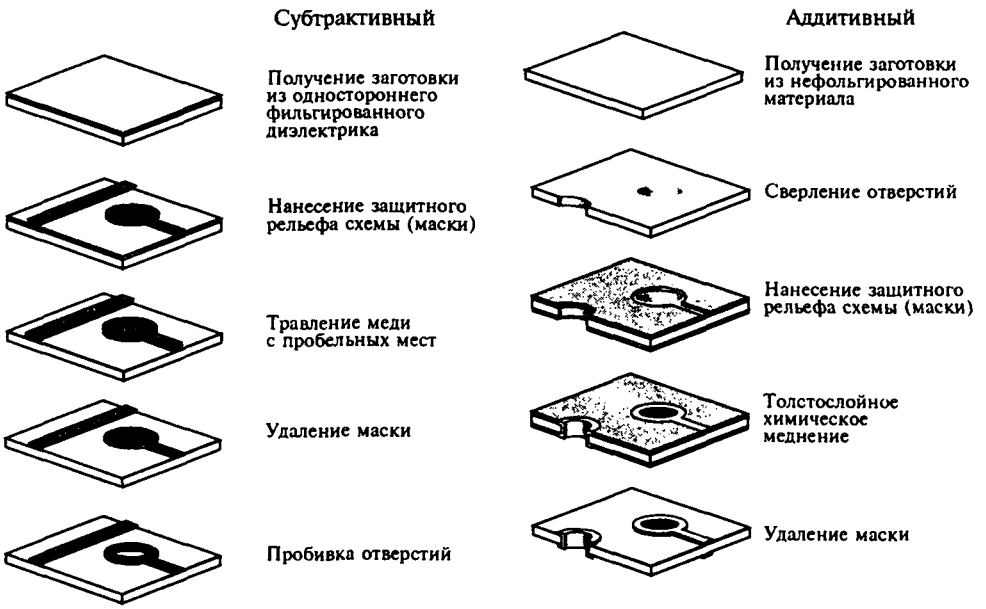
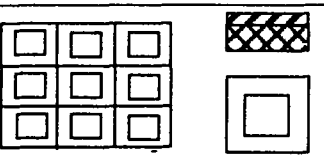
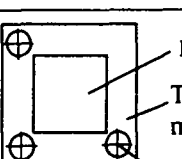


Рис. 8.10. Методы изготовления проводящих слоев печатных плат

Таблица 8.11. **Основные операции химического негативного метода**

№	Основные операции ТП	Возможные способы получения	Эскиз этапа
1	Входной контроль диэлектрика		
2	Раскрой материала		 Групповая заготовка Единичная заготовка ПП
3	Получение заготовок и фиксирующих (базовых) отверстий	Штамповка	 ПП Технологическое поле Базовые отверстия

Окончание табл. 8.11

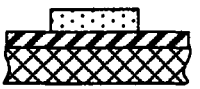
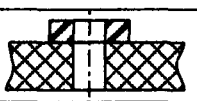
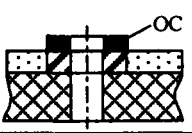
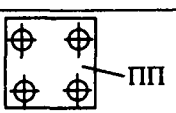
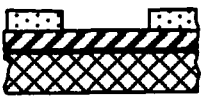
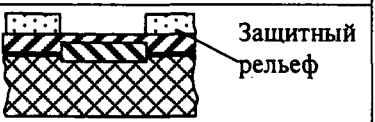
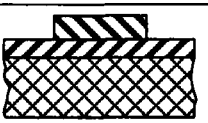
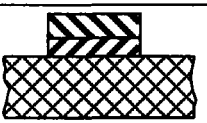
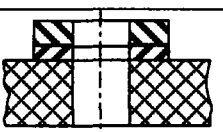
№	Основные операции ТП	Возможные способы получения	Эскиз этапа
4	Подготовка поверхности заготовки	Механический способ	
5	Получение защитного рельефа	1. Сеткография (СГ) 2. Офсетная печать *Подготовительные этапы:* Изготовление трафаретов для СГ Изготовление офсетной формы	
6	Сушка	1. Ультрафиолетовая сушка 2. Термическая сушка	
7	Травление меди с пробельных мест		
8	Удаление защитного рельефа		
9	Получение монтажных отверстий	1. Штамповка 2. Сверление	
10	Нанесение защитной паяльной маски	Сеткография *Подготовительный этап* Изготовление трафаретов	
11	Сушка	1. Ультрафиолетовая 2. Термическая	
12	Лужение		
13	Отмывка от флюса		
14	Маркировка	1. Сеткография 2. Каплеструйный метод *Подготовительный этап* Изготовление трафарета	
15	Контроль электрических параметров		
16	Вырубка по контуру и получение крепежных отверстий	Штамповка	

Таблица 8.12. **Основные операции химического позитивного метода**

№	Основные операции ТП	Эскиз этапа
1	Входной контроль диэлектрика	
2	Раскрой материала	
3	Получение заготовок и базовых отверстий	См. табл. 8.11 п.3
4	Подготовка поверхности	
5	Получение защитного рельефа на пробельных участках	
6	Нанесение металлорезиста на проводники	
7	Удаление защитного рельефа	
8	Травление меди	
9	Сверление или пробивка отверстий	
10	Вырубка по контуру и получение крепежных отверстий	См. табл. 8.11, п. 16

В случае использования нефольгированного жесткого основания схему техпроцесса изготовления ОПП можно представить в виде в табл. 8.13.

Двусторонние печатные платы (ДПП) применяют практически во всех видах ЭА. ДПП 1-, 2- и 3-го классов точности изготавливают в мелкосерийном, серийном и крупносерийном производстве, 4- и 5-го — в серийном, прецизионные — мелкосерийном производстве. Максимальные габариты ДПП 500х600 мм, минимальный диаметр отверстий — 0,4 мм. Материалы основания ДПП приведены в табл. 8.3. Для прецизионных ДПП применяют материалы с толщиной фольги 5 мкм или нефольгированные диэлектрики. Гибкие ДПП выполняют на гибком тонком фольгированном или нефольгированном основании. В табл. 8.14 и 8.15 приведены основные этапы ТП изготовления ДПП на жестком фольгированном основании комбинированным позитивным методом.

Таблица 8.13. **Основные операции изготовления ОПП на жестком нефольгированном основании**

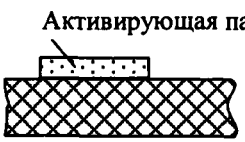
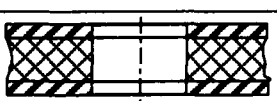
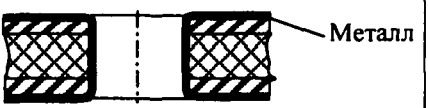
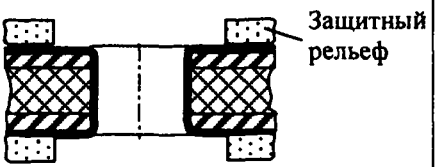
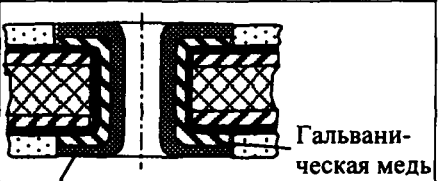
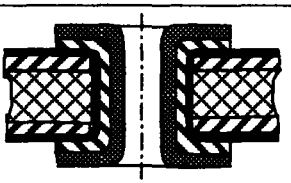
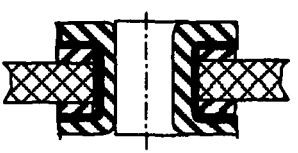
№	Основные операции ТП	Возможные способы получения	Эскиз этапа
№ 1, 2, 3 — см. табл. 8.11			
4	Подготовка поверхности заготовки	Химический способ	
5	Получение рисунка схемы	СГ активирующими пастами *Подготовительный этап* Изготовление трафаретов для СГ	
6	Металлизация рисунка схемы	Метод замещения активирующих паст	
7	Толстослойное химическое меднение		
Далее см. табл. 8.11, пункты с 9 по 16.			

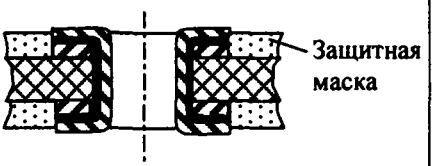
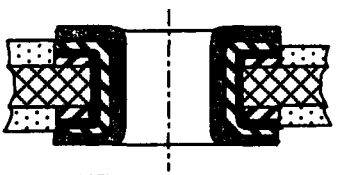
Таблица 8.14. **Основные этапы ТП изготовления ДПП на фольгированном основании комбинированным позитивным методом**

№	Основные этапы	Возможные способы получения	Эскиз этапа
1	Входной контроль диэлектрика		
2	Получение заготовок	1. Резка 2. Штамповка 3. Лучом лазера (для прецизионных ПП)	
3	Получение базовых отверстий	Сверление	См. табл. 8.11 п.3
4	Получение монтажных отверстий	Сверление	

Продолжение табл. 8.14

№	Основные этапы	Возможные способы получения	Эскиз этапа
5	Металлизация предварительная	1. Магнетронное напыление 2. Термолиз 3. Химическое меднение 3...5 мкм 4. Химико-гальваническое меднение	
6	Подготовка поверхности	1. Суспензия пемзового абразива 2. Подтравливание	
7	Получение защитного рельефа	1. СГ 2. ФХ с органопроявляемым СПФ 3. ФХ щелочепроявляемым СПФ 4. С СПФ лазерного экспонирования (для прецизионных ПП)	
8	Электрохимическая металлизация	1. Гальваническое меднение и нанесение металлорезиста 2. Гальваническое меднение и нанесение полимерного травильного резиста	
9	Удаление защитного рельефа		
10	Травление меди с пробельных мест	1. Травление с удалением металлорезиста 2. Травление с удалением полимерного резиста	

Окончание табл. 8.14

№	Основные этапы	Возможные способы получения	Эскиз этапа
11	Нанесение защитной паяльной маски	СГ	
12	Лужение		
13	Отмывка флюса		
14	Получение крепежных отверстий и обработка по контуру	1. Лазерная обработка 2. Сверление отверстий и фрезерование по контуру	См. табл. 8.11 п. 16
15	Промывка	Ультразвуковой метод	
16	Контроль электрических параметров		

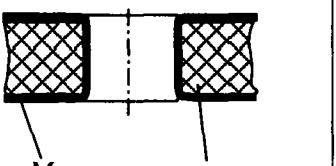
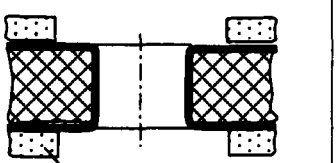
Примечание. СПФ — сухой пленочный фоторезист.

Комбинированный позитивный метод применяют также при изготовлении наружных слоев МПП методом металлизации сквозных отверстий (ММСО), попарного прессования, послойного наращивания и др. В табл. 8.15 приведены основные этапы ТП изготовления ДПП на нефольгированном основании электрохимическим методом.

При изготовлении ДПП на нефольгированном основании применяют методы, позволяющие получить ПП по 4-му и 5-му классам точности: электрохимический (полуаддитивный), аддитивный, фотоформирование, тентинг-метод, с использованием активирующих паст и др.

Рост степени интеграции микросхем ведет к увеличению выделяемой ими теплоты. Отвод теплоты от таких микросхем в процессе эксплуатации — сложная конструкторско-технологическая задача. Решить ее можно использованием ПП на металлическом основании, схема технологического процесса

Таблица 8.15. **Основные этапы ТП изготовления ДПП на нефольгированном основании электрохимическим методом**

№	Основные этапы	Возможные способы получения	Эскизы этапа
№ с 1 по 4 — см. табл. 8. 14 на нефольгированном основании			
5	Подготовка поверхности	1. Физические методы 2. Химические методы	
6	Металлизация заготовок	*ДПП общего применения* 1. Магнетронное напыление 2. Термолиз и предварительное электролитическое меднение *ДПП прецизионные* 1. Химическое меднение 3...5 мкм 2. Химико-гальваническое меднение 5...10 мкм	
7	Подготовка поверхности	1. Суспензия пемзового абразива 2. Подтравливание	
8	Нанесение защитного рельефа	*ДПП общего применения* 1. СГ 2. ФХ 3. Метод фотоселективной активации *ДПП прецизионные* 1. ФХ и ФХ с ФР лазерного экспонирования	
Далее — по табл. 8.14, начиная с п. 8			

изготовления которых приведена в табл. 8.16. В качестве основания применяют металлические листы из алюминия, стали, титана или меди толщиной 0,1...3,0 мм. Токопроводящие участки ПП получают электрохимическим или аддитивным методами. Основным при этом является необходимость обеспечения надежной электрической изоляции печатных проводников от металлического основания.

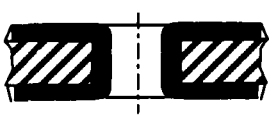
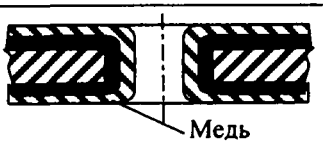


Рис. 8.11. Форма печатного проводника в рельефной плате

В транспортируемой ЭА нашли применение *рельефные платы* (РП), получившие свое название из-за рельефной формы проводников, имеющих в сечении форму трапеции (рис. 8.11) и формируемых в объеме изоляционного основания платы. Такая кон-

струкция печатного проводника в значительной степени повышает стойкость к перепайкам (до 50 перепаек) за счет высокой прочности сцепления меди с основанием, хотя в 2—3 раза меньше по ширине по сравнению с обычным печатным проводником при одном и том же сечении по меди.

Таблица 8.16. **Основные операции изготовления ДПП на металлическом основании**

№	Основные этапы	Возможные способы получения	Эскизы этапа
1	Входной контроль металлической пластины		
2	Получение заготовки основания	Резка	
3	Рихтовка		
4	Получение базовых отверстий	Сверление	
5	Получение монтажных отверстий	Сверление	
6	Нанесение изоляционного покрытия	1. Электростатический метод нанесения эпоксидной композиции 2. Нанесение лака методом электрофореза	
7	Повторная обработка монтажных отверстий	Сверление и шлифование	
8	Подготовка поверхности	1. Физические методы 2. Химические методы	
9	Металлизация заготовок	1. Химическое меднение 3...5 мкм 2. Химико-гальваническое меднение 5...10 мкм	
10	Подготовка поверхности	1. Суспензия пемзового абразива 2. Подтравливание покрытия	
Далее — см. табл. 8.14, начиная с п. 7			

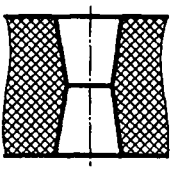


Рис. 8.12. Форма монтажных отверстий в РФ

В рельефных платах металлизированные монтажные отверстия имеют форму сдвоенной воронки без цилиндрической части (рис. 8.12), что позволяет отказаться от контактных площадок. Такая форма отверстий обеспечивает прочное сцепление слоя металлизации с диэлектриком, повышает надежность РП в эксплуатации.

Отсутствие контактных площадок и малая ширина проводников позволяют изготавливать рельефные двусторонние платы повышенной плотности монтажа, эквивалентные 5—14-слойным МПП, и размещать четыре проводника между отверстиями диаметром 0,8 мм и межцентровым расстоянием 2,5 мм.

Ортогональное расположение проводников (в продольном направлении на одной стороне и в перпендикулярном на другой) позволяет формировать переходные отверстия в любой точке пересечения трасс с шагом 0,3 мм, что укорачивает электрические связи, снижает уровень помех, паразитные связи и т. п. Роль экранов в рельефных платах выполняют шины «земли» и «питания», которые чередуются с проводниками логических связей. Проектирование таких плат осуществляют с помощью САПР на базе пакетов прикладных программ САПР «RELEF» и др.

Существуют три способа получения рельефного рисунка схемы: фрезерование на станках с ЧПУ граверными резцами, прессование диэлектрика на специальных рельефных пресс-формах с последующим досверливанием отверстий на координатно-сверлильных станках и литье под давлением эпоксидной пластмассы (при этом получают канавки под проводники и сквозные отверстия платы).

Токопроводящие участки РП изготавливают субтрактивным, полуаддитивным и аддитивным методами.

Достоинствами РП являются: возможность осуществления сверхвысокой плотности монтажа микросхем и ЭРЭ, высокий класс точности (4 или 5); возможность использования технологии поверхностного монтажа; сравнительно низкая трудоемкость проектирования за счет применения простого алгоритма трассировки; высокая эксплуатационная надежность; замена фольгированных стекловолокнистых диэлектриков лучшими по параметрам полимерными нефольгированными материалами, имеющими более низкую стоимость; отсутствие экологически вредных фотохимических процессов нанесения рисунка, процессов изготовления оригиналов и фотошаблонов.

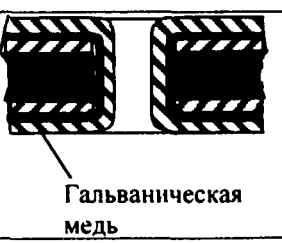
Многослойные печатные платы (МПП) состоят из нескольких сигнальных слоев, разделенных изоляционными прокладками и, при необходимости, слоями электропитания и экранирующими слоями (рис. 8.2, *в*). Вследствие высокой плотности размещения печатных проводников МПП

обладают высокой коммутационной способностью. К достоинствам применения МПП можно отнести возможность передачи наносекундных сигналов без существенных искажений и потерь, высокую устойчивость к внешним воздействиям, снижение количества внешних контактов. Следует отметить и недостатки МПП: высокая стоимость, повышенная трудоемкость проектирования и изготовления, высокие требования к исходным материалам и точности изготовления печатных проводников и переходных отверстий и т. д.

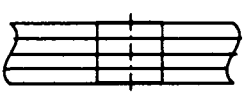
Широкое применение в ЭА нашли методы: металлизации сквозных отверстий, открытых контактных площадок, попарного прессования, послойного наращивания рисунка и МПП с выступающими выводами. Название эти виды МПП получили соответственно технологическим методам изготовления.

Базовым технологическим процессом изготовления МПП является метод металлизации сквозных отверстий, этапы выполнения которого приведены в табл. 8.17.

Таблица 8.17. **Основные этапы ТП изготовления МПП методом металлизации сквозных отверстий**

№	Основные этапы	Возможные способы получения	Эскизы этапа
	Изготовление слоев (п. 1—12)		
1	Входной контроль диэлектрика		
2	Получение заготовок слоев	1. Штамповка 2. Резка	См. табл. 8.14 п. 2
3	Получение базовых и технологических отверстий	1. Штамповка 2. Сверление	
4	Получение переходных отверстий	1. Лазер 2. Сверление	См. табл. 8.14 п. 4
5	Предварительная металлизация	1. Магнетронное напыление 2. Химическое меднение 3...5 мкм	См. табл. 8.14 п. 5
6	Электрохимическая металлизация	Гальваническое меднение	

Окончание табл. 8.17

№	Основные этапы	Возможные способы получения	Эскизы этапа
7	Подготовка поверхности слоев	1. Химический способ 2. Суспензия пемзового абразива	
8	Получение защитного рельефа	1. СГ 2.Офсетная печать 3. ФХ: СПФ органопроявляемый СПФ щелочепроявляемый	
9	Травление меди с пробельных мест		
10	Удаление защитного рельефа		
11	Подготовка поверхности слоев	1. Подтравливание 2. Оксидирование 3. Суспензия пемзового абразива	
12	Сушка	1. Термическая 2. В инертной среде	
13	Прессование слоев	1. Гидравлическое 2. Гидравлическое с вакуумированием 3. Вакуумное автоклавное	
14	Сверление и подготовка сквозных отверстий	1. Гидроабразивная обработка и подтравливание диэлектрика в отверстиях 2. Промывка водной суспензией высокого давления и плазменная очистка отверстий	
15	Предварительная металлизация	1. Магнетронное напыление 2. Химическое меднение 3..5 мкм 3. Химико-гальваническое меднение	См. табл. 8.14 п. 5
Далее — см. табл. 8.14, начиная с п. 8			

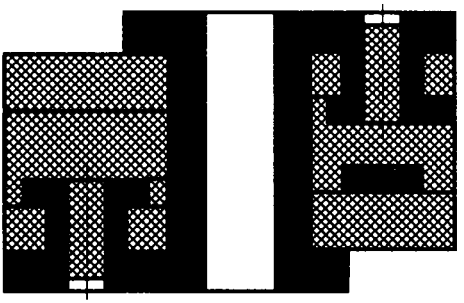


Рис. 8.13. МПП, изготовленная методом попарного прессования

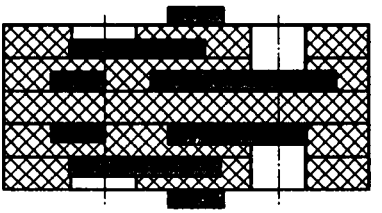


Рис. 8.14. МПП с открытыми контактными площадками

При изготовлении МПП *методом попарного прессования* (рис. 8.13) сначала получают две двусторонние ПП с металлизированными отверстиями, затем их прессуют вместе с размещенной между ними изоляционной прокладкой.

Полученный пакет сверлят, полученные отверстия очищают, затем металлизируют. Таким образом осуществляют электрические соединения между наружными слоями. К недостаткам этого метода изготовления МПП можно отнести длительный технологический цикл последовательного выполнения операций, большое количество химико-гальванических операций.

Особенностью конструкции МПП *с открытыми контактными площадками* (рис. 8.14) является отсутствие электрической связи между слоями и ее появление только после установки и пайки выводов микросхем и ЭРЭ к контактным площадкам любого из слоев. Каждый слой (их может быть более двадцати) изготавливают на одностороннем фольгированном диэлектрике химическим негативным методом. Отверстия в слоях (круглые — для штыревых и прямоугольные — для планарных выводов) получают штамповкой. После сборки, совмещения и склеивания слоев клеем БФ-4 на специальном приспособлении обеспечивается доступ к контактным площадкам внутренних слоев. Для увеличения площади контакта диаметр контактной площадки должен быть больше диаметра отверстия.

К достоинствам МПП с открытыми контактными площадками следует отнести большое число слоев, ремонтопригодность, а к недостаткам — невысокий класс точности.

В МПП с *выступающими выводами* электрическая связь между слоями осуществляется печатными проводниками внутренних слоев, отогнутых на наружный слой МПП и закрепленных изоляционными накладками (рис. 8.15). К преимуществам данного метода относятся большое число слоев (15), высокая механическая прочность, возможность параллельного выполнения операций.

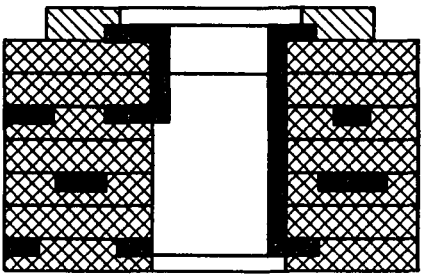


Рис. 8.15. МПП с выступающими выводами

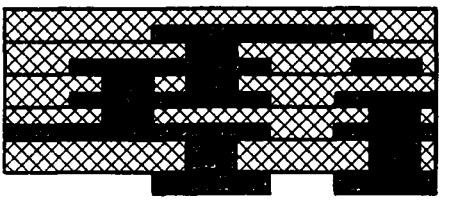


Рис. 8.16. МПП, изготовленная методом послойного наращивания

Процесс изготовления МПП методом послойного наращивания (рис. 8.16) выполняется следующим образом. Сначала на первый слой перфорированного диэлектрика напрессовывается медная фольга с одной стороны и проводится операция химико-гальванического меднения. При этом медь полностью заполняет отверстия в диэлектрике и осаждается на поверхности диэлектрика, свободной от медной фольги. На этом сформированном проводящем слое химическим негативным методом выполняется рисунок схемы, затем напрессовывается второй слой перфорированного диэлектрика, проводится химико-гальваническое меднение отверстий и поверхности диэлектрика второго слоя, выполняется рисунок второго слоя и т. д. Связь между слоями осуществляется при помощи столбиков меди в отверстиях.

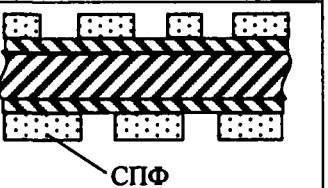
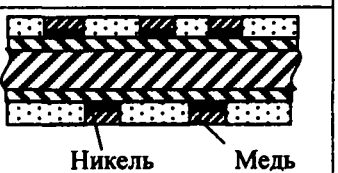
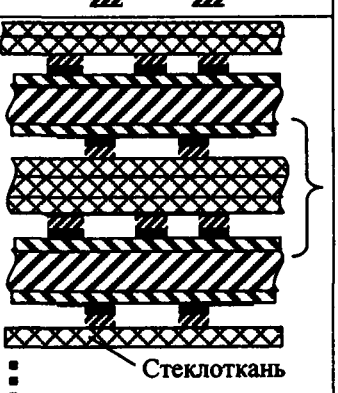
К преимуществам этого метода изготовления МПП относятся надежность межслойных соединений, большое число слоев, к недостаткам — длительный технологический цикл, невозможность использования элементов со штыревыми выводами, высокая стоимость изготовления.

В единичном производстве применяют *техпроцесс полностью аддитивного формирования отдельных слоев* (ПАФОС), основные этапы выполнения которого приведены в табл. 8.18.

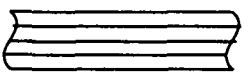
Таблица 8.18. **Основные этапы ТП ПАФОС**

№	Основные этапы	Возможные способы получения	Эскизы этапа
1	Получение заготовки из нержавеющей стали (временного носителя)	Штамповка	
2	Получение базовых отверстий	Сверление	

Продолжение табл. 8.18

№	Основные этапы	Возможные способы получения	Эскизы этапа
3	Предварительная металлизация	Гальваническое меднение — 15 мкм	
4	Получение защитного рельефа	ФХ	
5	Металлизация электрохимическая	Гальваническое никелирование 2 мкм и гальваническое меднение 25 мкм	
6	Удаление защитного рельефа		
7	Прессование		
8	Отделение слоя от временного носителя	Механический способ	

Окончание табл. 8.18

№	Основные этапы	Возможные способы получения	Эскизы этапа
9	Травление медной шины с заготовки внутреннего слоя МПП		 Слой МПП
10	Прессование слоев		
11	Получение сквозных отверстий		
Далее — см. табл. 8.14, начиная с п. 5			

Отметим, что в целом ТП изготовления МПП включает порядка 100 операций с использованием большого количества оборудования (до 40...50 единиц). Рассмотрим более подробно основные этапы изготовления ПП.

8.5. Основные технологические этапы в производстве печатных плат

Получение заготовок печатных плат

Заготовки ПП получают из листа фольгированного или нефольгированного материала стандартных размеров путем резки на гильотинных или роликовых ножницах, дисковыми фрезами или штамповкой (рис. 8.17). Резку фрезерованием применяют в мелкосерийном многономенклатурном производстве. Проводят раскрой листа на полосы и каждой полосы — на отдельные заготовки. На заготовке предусматривают технологические поля, где располагают базовые (фиксирующие) и технологические отверстия и которые по завершении изготовления ПП удаляют штамповкой или фрезерованием (рис. 8.18).

Тест-купон — часть заготовки ПП, которая служит для оценки качества изготовления ПП, прошедшая с ней все технологические операции и отделяемая перед испытаниями.

Базовые и технологические отверстия можно получить пробивкой одновременно при вырубке заготовки ПП из полосы; пробивкой в заготовке ПП, полученной резкой; сверлением заготовок, полученных резкой или сверлением по кондуктору на настольных сверлильных станках.

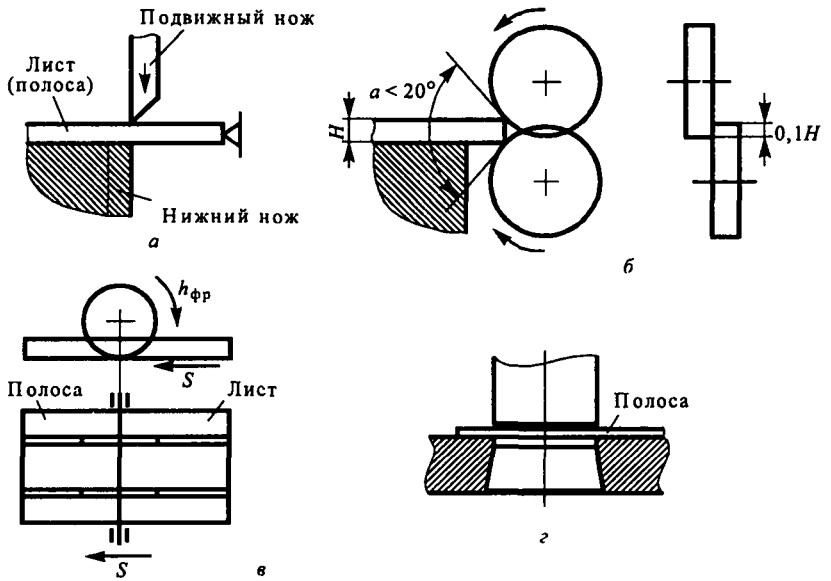


Рис. 8.17. Способы резки листа на полосы:

а — на гильотинных ножницах; *б* — на роликовых ножницах; *в* — дисковыми фрезами; *г* — штамповкой

Получение монтажных и переходных отверстий в печатных платах

Эта операция является одной из наиболее важных в производстве ПП всех типов, так как:

обеспечивает качество получения токопроводящего слоя в отверстиях после их металлизации и надежность электрических параметров ПП;

обеспечивает точность совмещения токопроводящих рисунков схемы, расположенных на противоположных сторонах ДПП или разных слоях МПП;

брак на этой операции является необратимым.

В связи с этим к качеству выполнения отверстий предъявляют следующие требования:

цилиндрические отверстия должны быть с гладкими стенками;

отверстия должны быть без зауенцев;

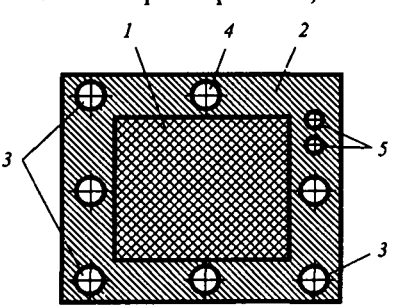


Рис. 8.18. Отверстия на заготовке ПП:

1 — ПП; *2* — технологическое поле; *3* — базовые отверстия; *4* — технологические отверстия, 4 шт.; *5* — тест-купон

предельные отклонения центров отверстий относительно узлов координатной сетки должны составлять ±0,015 мм;

отсутствие деструкции диэлектрика в отверстиях и размазывания (наволакивания) смолы по стенкам отверстий, так как это препятствует осаждению меди и приведет к разрыву электрической цепи;

точность сверления отверстий ±(0,12 или 0,08) мм.

Диаметр отверстий под металлизацию должен быть примерно на 0,12 мм больше расчетного, чтобы скомпенсировать толщину осаждаемых меди и металлорезиста. Сложность выполнения операции связана с обработкой в одном технологическом цикле различных по свойствам материалов, таких как медь, алюминий, стекловолокно, смола и др., для каждого из которых требуются разные режимы обработки, и существует большое количество факторов, влияющих на качество полученных отверстий.

Кроме того, повышение плотности монтажа, уменьшение ширины проводников, широкое внедрение технологии поверхностного монтажа, МПП с числом слоев более 50 приводит к необходимости получения глубоких микроотверстий (∅ 0,1...0,3 мм), а также глухих отверстий в МПП. Поэтому все больше ужесточаются требования к оборудованию и технологии их изготовления.

В производстве ПП применяют следующие способы получения монтажных и переходных отверстий: сверление на станках с числовым программным управлением; пробивка (для отверстий, не подлежащих в дальнейшем металлизации); лазерное сверление (для отверстий малого диаметра, в том числе глубоких и глухих); травление (для ПП на полиимиде).

Сверление монтажных и переходных отверстий. На качество сверления оказывают влияние конструкция сверлильного станка, геометрия и материал сверла, точность позиционирования, способ закрепления ПП на столе станка, скорость резания, точность осевой подачи при сверлении и обратном ходе сверла, способ удаления стружки и пр. Схема конструкции четырехшпиндельного станка для сверления пакетов заготовок ПП приведена на рис. 8.19.

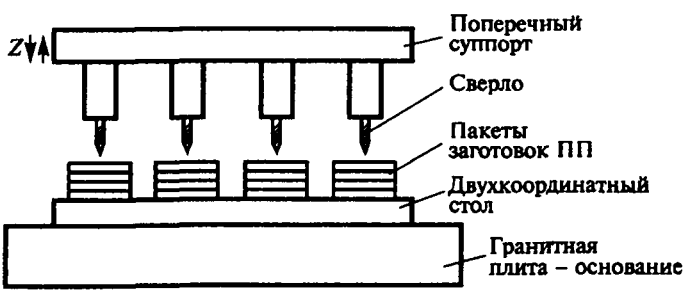


Рис. 8.19. Схема четырехшпиндельного сверлильного станка

В программах для сверления монтажных и переходных отверстий предусматривается также:

сверление тестовых отверстий на технологическом поле для проверки качества, размера отверстий, степени заточки сверла;

сверление отверстий для совмещения с фотошаблонами, нанесения паяльной маски и обработки по контуру ПП;

автоматическая смена инструмента и программирование подачи, числа оборотов и скорости обратного хода;

программирование по оси *Z*;

совместимость со всеми форматами и системами кодирования.

При сверлении используют шпиндели с воздушными подшипниками и жидкостным охлаждением.

Заготовки ПП, собранные в пакеты по 3 и более штук, скрепленные штифтами или нет, базируют на рабочем столе сверлильного станка. Сверху и снизу заштифтованных пакетов размещают листы гетинакса или алюминия для исключения отрыва фольги при входе и выходе сверла и пр. Алюминиевый материал верхней заготовки действует как втулка для входа сверла под углом 90°, уменьшает заусенцы при сверлении, а также служит теплоотводом для предотвращения нагрева эпоксидной смолы внутри отверстия. Заготовки с малым диаметром отверстий (менее 0,3 мм) сверлят по одной или по две.

Сверлильные станки снабжены механизмом автоматической смены сверл после сверления определенного количества отверстий или после запрограммированного числа рабочих ходов. В магазине механизма смены инструментов для каждой сверлильной головки может храниться 100 и более инструментов, что позволяет работать станку несколько часов практически без простоев. Сверла из магазинов извлекаются при помощи пневматических захватов.

Режимами сверления отверстий являются:

скорость резания V — до 180 м/мин;

скорость вращения шпинделя n = 1000...180 000 об/мин;

подача сверл — 0,02...0,05 мм/об.

Режимы сверления зависят от диаметра обрабатываемых отверстий, их значения встраивают в программу сверления. Для сверления отверстий ∅ 0,1...0,5 мм в ПП со сверхузкими печатными проводниками используют сверлильные станки со шпинделями на воздушных подшипниках и микросверла с точностью ±0,003 мм.

Лазерное сверление. При воздействии излучения на обрабатываемую заготовку ПП происходит испарение или взрывное разрушение материала. Лазерным сверлением в ПП могут быть получены сквозные отверстия диаметром менее 50 мкм в фольгированных и нефольгированных заготовках

ПП, глухие отверстия диаметром до 25 мкм, глубиной менее 50 мкм в одностороннем фольгированном диэлектрике.

Лазерное сверление отверстий ПП осуществляют двумя способами:

с использованием специальной металлической маски с отверстиями, после совмещения которой с заготовкой ПП и воздействия лазерного излучения происходит испарение материала основания ПП в местах расположения отверстий на маске. Достоинством способа является высокая производительность, недостатком — необходимость изготовления металлической маски с высокоточными отверстиями малого диаметра и точным их расположением на поверхности маски;

путем подачи дозированного лазерного излучения импульсами малой длительности в зону формирования отверстий при обходе этих зон по программе.

Преимущества лазерного сверления: возможность получения сквозных и глухих отверстий диаметром до 25 мкм; высокое качество краев и стенок отверстий (меди, стекловолокна или полиимида); высокая производительность (порядка 1200 сквозных отверстий в минуту); низкая стоимость; отсутствие деструкции органических материалов.

Подготовка поверхности

Основной целью этапа подготовки поверхности является удаление заусенцев, смолы и механических частиц из отверстий, получение необходимой шероховатости поверхности, активирование поверхности перед химическим меднением, удаление оксидов, масляных пятен, пыли, грязи.

На этом этапе применяют механическую обработку дисковыми щетками, щеточную или струйную обработку абразивами, химическую подготовку, электрохимическую обработку, плазмохимическое травление. Каждый из способов подготовки обладает преимуществами и недостатками, поэтому при выборе того или иного способа обработки необходимо учитывать все параметры ТП.

Металлизация печатной платы

Основным назначением процесса металлизации ПП является получение токопроводящих участков ПП (проводников, металлизированных отверстий, контактных площадок, концевых разъемов, ламелей и пр.), защита их от *растравливания* на операции травления меди с пробельных мест и от окисления для обеспечения *паяемости* ПП. Для получения металлических покрытий в производстве ПП применяют: химическую металлизацию; гальваническую металлизацию; магнетронное напыление.

Химическая металлизация (меднение) применяется в производстве ПП: для получения тонкого (3...5 мкм) подслоя меди на стенках монтажных и переходных отверстий, чтобы сделать их диэлектрические поверхности токопроводящими; в аддитивном методе — для получения токопроводящих участков селективным меднением (слой меди толщиной порядка 35 мкм).

Химическое меднение — окислительно-восстановительный автокаталитический процесс, в котором в качестве катализатора на начальном этапе выступает металлический палладий, а затем осажденные кристаллы меди катализируют дальнейшее выделение меди, и процесс протекает самопроизвольно. Основные требования к химически осажденной меди:

полное покрытие стенок отверстий для исключения разрыва электрических цепей;

хорошая адгезия слоя химической меди к диэлектрику основания для обеспечения стойкости к термоудару при пайке и перепайке.

Заготовки ПП устанавливают при помощи технологических отверстий в подвески для химического меднения, изготовленные из коррозионностойкой стали, фторопласта, титана или полипропилена, и помещают на линию химического меднения, состоящую из нескольких ванн для подготовки поверхности и химического меднения, в каждую из которых подвески с заготовками перемещаются по программе автооператором. Ванна для химического меднения имеет устройства поддержания температуры, барботирования для перемешивания раствора воздухом, фильтрации, возвратно-поступательного перемещения заготовок для прокачивания раствора через отверстия, чтобы обеспечить полное покрытие стенок отверстий медью.

Процесс химического меднения проходит со скоростью металлизации 3...4 мкм/ч. Для него характерны: длительный срок службы раствора (10...12 месяцев), стабильность и экономичность раствора, простота утилизации отработанных растворов, минимальное влияние на окружающую среду.

При изготовлении ПП аддитивным методом при толстослойном химическом меднении (25...35 мкм) необходима постоянная корректировка раствора, контролируемая автоматизированной системой дозирования компонентов электролита по результатам, полученным с датчиков-анализаторов их концентраций.

Гальваническая металлизация в процессе изготовления ПП осуществляется несколько раз.

1. Предварительное гальваническое меднение для защиты тонкого слоя химической меди от повреждения, улучшения адгезии и структуры осадка, (толщина слоя меди 5...7 мкм).

2. Гальваническое меднение для получения основного токопроводящего слоя меди в монтажных и переходных отверстиях, на проводниках и контактных площадках (толщина 20...25 мкм).

3. Гальваническое осаждение *металлорезиста* (защитного травильного *резиста* на операции травления) на проводники, контактные площадки, в монтажные отверстия, для защиты на операции травления меди с пробельных мест.

4. Гальваническое осаждение металлов и сплавов на концевые разъемы ПП для повышения износостойкости, твердости, снижения переходного сопротивления и пр.

Гальваническое осаждение покрытий проводится в ваннах с электролитом, в которые погружают заготовки ПП, предварительно закрепленные в специальных подвесках. Полученное гальваническое покрытие должно быть:

сплошным, без пор, включений, разрывов, раковин;

заданной конфигурации; пластичным, чтобы обеспечить устойчивость к перегибам, короблению ПП, воздействию ударов и вибраций;

элементы токопроводящего рисунка, сформированные гальваническими процессами, должны иметь ровные края, не иметь разрывов, темных пятен, вздутий, отслоений;

неровности по краю не должны уменьшать их минимально допустимые размеры и расстояния между ними, так как это связано с электрическими параметрами ПП, такими, как минимально допустимая плотность тока и напряжение (в противном случае может произойти перегрев проводников или пробой диэлектрика);

равномерным по толщине на поверхности и в отверстиях ПП, что связано с обеспечением заданных электрических характеристик (минимально допустимой плотности тока) и экономическими соображениями, так как для того чтобы получить слой заданной толщины на стенках отверстий, необходимо осаждать больший по толщине слой металла или сплава на поверхность ПП, а это связано с лишними затратами электроэнергии и химикатов.

Важным в этом процессе является получение равномерного покрытия. Повысить равномерность гальванических покрытий можно путем:

параллельного расположения заготовок ПП относительно анодов;

увеличения расстояния между анодом и катодом (до 180 мм);

повышения рассеивающей способности электролита;

применения нестационарных режимов осаждения (например, реверса тока);

применения ультразвуковых колебаний при осаждении;

применения экранов, закрывающих периферийные участки заготовки ПП;

применения поверхностно-активных веществ, повышающих рассеивающую способность электролита;

перемешивания, барботирования воздухом электролитов, возвратно-поступательного перемещения подвесок с заготовками, в результате которых изменяется концентрационная поляризация электродов и пр.

Гальваническое меднение предназначено для осаждения слоя меди, являющегося основным токопроводящим слоем в структуре печатных элементов ПП — проводников, коммутационных элементов и пр. (рис. 8.20).

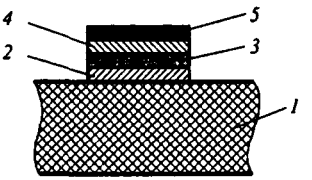


Рис. 8.20. Структура печатного элемента ПП:

1 — основание ПП; *2* — медная фольга; *3* – химическая (1,5...2,5 мкм) и предварительно осажденная гальваническая медь (5...7 мкм); *4* — гальваническая медь (25 мкм); *5* — сплав олово-свинец (9...12 мкм)

Помимо общих требований к гальваническим покрытиям, перечисленным выше, гальваническая медь должна отвечать также следующим требованиям:

металлизация на поверхности и в отверстиях ПП должна быть сплошной;

цвет осадка меди — светло-розовый;

относительное удлинение меди — не менее 6 %;

предел прочности на разрыв — не менее 20 кг/мм^2;

удельное сопротивление — 0,0172 Ом · мм^2/м;

толщина слоя меди в монтажных и переходных отверстиях — не менее 25 мкм;

осадок меди должен иметь мелкозернистую структуру, так как он в значительной степени определяет структуру осаждаемого на медь металлорезиста и его защитные свойства на операции травления меди с пробельных мест.

Гальваническое осаждение металлорезиста осуществляют для защиты проводников, контактных площадок и металлизированных отверстий при проведении операции травления меди с пробельных мест. В качестве металлорезиста в производстве ПП применяют золото, никель-золото, серебро, олово, свинец, олово-свинец, олово-никель, олово-висмут, олово-цинк и др.

Широкое применение имеет металлорезист на основе сплава олово-свинец (ОС), который используют в качестве металлорезиста на операции травления меди с пробельных мест или как металлорезист и покрытие, обеспечивающее после оплавления паяемость ПП.

При гальваническом осаждении металлов и сплавов *концевые контакты* ПП должны иметь минимальные и стабильные переходные сопротивления в месте контакта при эксплуатации и высокую износостойкость и твердость. Выполнение перечисленных требований, а также защита контактов от окисления обеспечивает гальваническое осаждение на контакты благородных металлов — золота, серебра, палладия и их сплавов. При выборе соответствующего покрытия учитывают тип контакта (подвижный, неподвижный), контактное давление, конструкцию контактной пары, электриче-

скую нагрузку (сила тока, напряжение), условия эксплуатации (влажность, пыль, газы и т. д.), долговечность, надежность.

Получение защитного рельефа

Нанесение защитного рельефа заключается в процессе переноса изображения рисунка печатных проводников на материал основания ПП, который осуществляют фотохимическим, сеткографическим, офсетным способом и др.

Защитный рельеф может быть *негативным* и *позитивным*.

Выбор способа получения защитного рельефа зависит от класса точности ПП, ширины проводников и расстояний между ними, размеров контактных площадок, точности получения размеров печатных элементов.

Фотохимический способ позволяет получить проводники и зазоры между ними порядка 0,1 мм с точностью ±0,03 мм. Процесс получения защитного рельефа состоит из следующих этапов:

– на поверхность заготовки ПП наносят фоторезист — фотополимерный материал, чувствительный к ультрафиолетовому (УФ) излучению (рис. 8.21);

– устанавливают фотошаблон, реперные знаки (перекрестия) которого совмещаются под микроскопом с центрами фиксирующих (базовых) отверстий заготовки ПП;

– проводят экспонирование рисунка схемы, в результате которого происходит полимеризация фоторезиста под действием УФ-излучения на участках ПП, которые находились под прозрачными частями фотошаблона;

– проявляют изображения рисунка.

Применяют фоторезисты негативные и позитивные, которые в свою очередь делятся на жидкие и сухие пленочные (СПФ). При использовании негативных фоторезистов экспонированные области заготовки ПП остаются на плате, а неэкспонированные вымываются при проявлении. В случае использования позитивных фоторезисторов экспонированные участки вымываются при проявлении.

Жидкие фоторезисторы просты в приготовлении и применении, не-

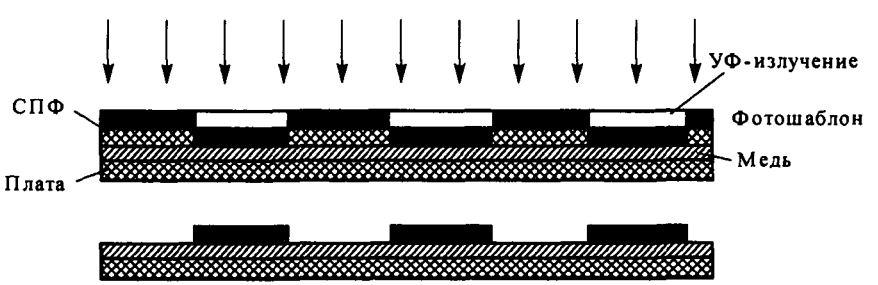


Рис. 8.21. Фотохимический способ нанесения защитного покрытия

токсичны, но им присущ ряд недостатков: низкая разрешающая способность (50 линий/мм), разрастание проводников над фоторезистом при гальваническом осаждении меди, окисление, ухудшение механической прочности и адгезии фоторезиста в условиях повышенной влажности и температуры, заполнение монтажных и переходных отверстий при нанесении на ПП, низкая устойчивость к действию электролитов гальванического меднения.

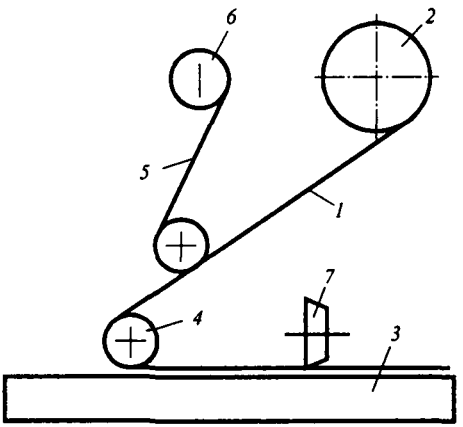


Рис. 8.22. Схема ламинатора:
1 — СПФ; *2* — рулон фоторезиста (СПФ); *3* — заготовка платы; *4* — прижимной валик; *5* — полиэтиленовая пленка; *6* — бобина; *7* — нож для резки СПФ

Сухие фоторезисты применяют при изготовлении рисунка слоев МПП, ГПП, ГПК, шлейфов, полосковых плат и т. п. высокого класса точности (с высокими требованиями по разрешающей способности).

Сухие пленочные фоторезисты состоят из трех слоев: защитной полиэтиленовой пленки, среднего слоя, чувствительного к УФ-излучению, и оптически прозрачной лавсановой пленки, предназначенной для защиты фоторезиста от окисления на воздухе. СПФ накатывают на поверхность ПП валиком, нагретым до 100...120 °С на установках для ламинирования (ламинаторах). При этом полиэтиленовая пленка наматывается на бобину, как это показано на схеме, поясняющей устройство ламинатора (рис. 8.22).

После нанесения СПФ платы выдерживают 30 мин при комнатной температуре в помещении с желтым светом («неактиничное освещение») для снятия внутренних напряжений в пленке. Экспонирование проводят через прозрачную лавсановую пленку так же, как и для жидких фоторезистов, применяя ультрафиолетовый источник света (ртутно-кварцевые лампы). Продолжительность экспонирования определяется опытным путем и составляет обычно 15...20 с. После экспонирования заготовка платы выдерживается 30 мин в затемненном месте для завершения процесса полимеризации засвеченных участков.

Проявление изображения рисунка проводят в установках струйного типа в растворе метилхлороформа в течение 1—2 мин. Удаление фоторезиста осуществляют распылением растворителя хлористого метилена под давлением 0,3...0,4 МПа. После проявления желательна промывка водой.

Фотохимический способ получения рисунка обеспечивает высокую точность рисунка и используется для ПП выше 3-го класса точности в мелкосерийном и серийном производствах.

К достоинствам СПФ следует отнести высокую разрешающую способность (возможно получать ширину проводников и зазоры между ними размерами до 0,05...0,1 мм), высокую стойкость в травильных растворах и электролитах гальванического меднения и нанесения сплава олово-свинец и олова, исключение попадания (затекания) фоторезиста в отверстия. Недостатками СПФ являются: выделение при ламинировании токсичных хлористого метилена и трихлорэтилена, наличие внутренних напряжений и усадочных процессов в пленке.

Широкое применение нашли СПФ марок СПФ-1, СПФ-2 (ТУ6-17-359-77) толщиной 20, 40 и 60 мкм (чем больше толщина, тем ниже разрешающая способность из-за «теневого эффекта»); СПФ-АС (ТУ6-17-691-83) для ПП высокого класса точности с повышенной разрешающей способностью; СПФ-В (ТУ АЛО-31-10), ТФПК (ТУ61У0.037.074), СПФ-ВЩ (ТУ16-503-244-84) — фоторезисты водощелочного проявления для исключения токсичных растворителей.

Для экспонирования фоторезиста можно применять лазерную установку. При этом рисунок схемы получают без применения фотошаблона, что исключает боковую подсветку проводников и смещение рисунка в результате усадки пленочных фотошаблонов.

Сеткографический способ заключается в получении изображения рисунка схемы при помощи трафаретных красок, которые наносят на ПП через *сетчатый трафарет* путем продавливания их *ракелем* (резиновой лопаткой) (рис. 8.23).

Сетчатые трафареты изготавливают из синтетических тканей, из металлических сеток (латунь, бронза, коррозионно-стойкая сталь) и из комбинированных сеток, в которых металлическая центральная часть, соответствующая размеру рабочего поля, вклеивается в натянутую на раму капроновую ткань клеем, например, «Адгезив-2В» или клеем «Виланд-5К» (ТУ6-0,5-221-1-77), а капрон под металлической сеткой удаляют концентрированной азотной кислотой. Сетка равномерно натягивается в раме с заданным усилием. Для получения рисунка трафарета применяют прямой или косвенный способы. При прямом способе на натянутые сетки наносится фоторезист типа ФСТ (ТУ610-028-029) или композиция «Фотосет-Ж» и получают изображение схемы фотохимическим способом

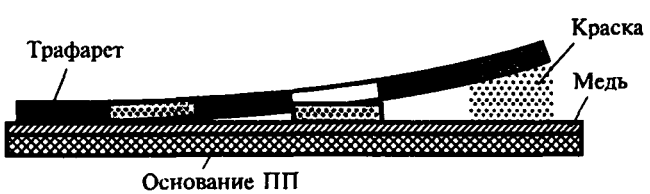


Рис. 8.24. Сеткографический способ нанесения защитного слоя

(экспонирование через ФШ, проявление, дубление, промывка, обезжиривание).

При косвенном способе рисунок схемы переносится на сетку с пленочных материалов, таких как пленка СПФ, пигментная бумага (ТУ29-01-06-70) и др. Достоинством косвенного метода является высокое качество изображения, недостатком — низкая тиражестойкость трафарета (до 600 оттисков), длительность процесса его изготовления.

Сетки, применяемые для сеткографического способа, характеризуются размером стороны ячейки, числом отверстий на 1 $см^2$ и пр.

Офсетный способ нанесения защитного рельефа включает следующие операции:

изготовление клише с изображением рисунка схемы;

нанесение на клише краски;

перенос изображения рисунка с клише на резиновый валик;

накатка резиновым валиком изображения рисунка на заготовку ПП.

Достоинствами этого способа являются высокая производительность, возможность автоматизации процесса, тиражеспособность; недостатком — низкая по сравнению с другими способами точность получения рисунка.

Нанесение защитной паяльной маски

Защитная паяльная маска наносится на всю поверхность ПП за исключением контактных площадок и металлизированных отверстий, которые при групповых процессах пайки элементов будут контактировать с расплавленным припоем. Таким образом обеспечивается значительная экономия припоя, так как припой во время пайки не осаждается на печатные проводники.

Защитные маски наносят сеткографическим способом (для ПП общего применения) с использованием эпоксидных композиций или фотохимическим способом, например, с применением СПФ (для прецизионных ПП). Точность нанесения защитной паяльной маски сеткографическим способом составляет ±0,4 мм. Такая низкая точность трафаретной печати объясняется тем, что необходимо обеспечить определенное расстояние между ПП и трафаретом для получения четкого несмазанного изображения. Наличие этого зазора приводит к прогибу трафарета во время продавливания маски через него и ограничивает точность нанесения.

Точность нанесения защитной маски фотохимическим способом как при нанесении рисунка и составляет ±0,1 мм. Возможны два способа нанесения паяльной маски:

после операции оплавления сплава олово-свинец — этот процесс называется «маска поверх оплавленного припоя», или «solder mask over tin-lead» (SMOTL-процесс);

после удаления травильного резиста с токопроводящих участков. Этот процесс называется «маска поверх открытой меди», или «solder mask over bare copper» (SMOBC-процесс).

В первом случае при пайке элементов волной припоя происходит расплавление припоя, находящегося под маской, а также вспучивание и разрушение самой защитной маски. Кроме того, существует вероятность образования перемычек припоя между соседними проводниками при высокой плотности монтажа.

Во втором случае таких проблем не существует, так как под защитной маской нет припоя. Преимуществом SMOTL-процесса является более надежная защита проводников оплавленным припоем, которая необходима для ПП, работающих в условиях повышенной влажности.

ПП для поверхностного монтажа обычно изготавливают по SMOBS-технологии. Это связано с высокой плотностью монтажа, необходимостью предотвращения растекания маски и ее смещения на контактные площадки. Применение SMOBS-процесса связано также с жесткими экологическими ограничениями по свинцу, необходимостью очистки отработанной воды при применении свинца и затратами на приобретение соответствующего оборудования.

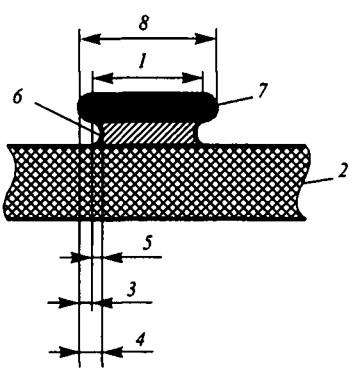


Рис. 8.24. Сечение проводника после травления:

1 — ширина проводника по рабочему фотошаблону; *2* — материал основания; *3* — разрастание; *4* — нависание; *5* — подтравливание; *6* — проводник; *7* — осаждение металла; *8* — ширина проводника

Травление меди с пробельных мест

Травление — химический процесс удаления меди с незащищенных резистом участков. Результатом выполнения этой операции является рисунок печатных элементов (проводников, контактных площадок и пр.), точность выполнения которых влияет на электрические характеристики ПП. Следует учитывать, что брак на этой операции (растравливание проводников, уменьшение ширины, площади поперечного сечения, подтравливание проводников и пр.) является необратимым.

Одним из дефектов при травлении является боковое подтравливание проводников и контактных площадок (рис. 8.24). Величина подтравливания составляет примерно 70 % от толщины медного слоя, что

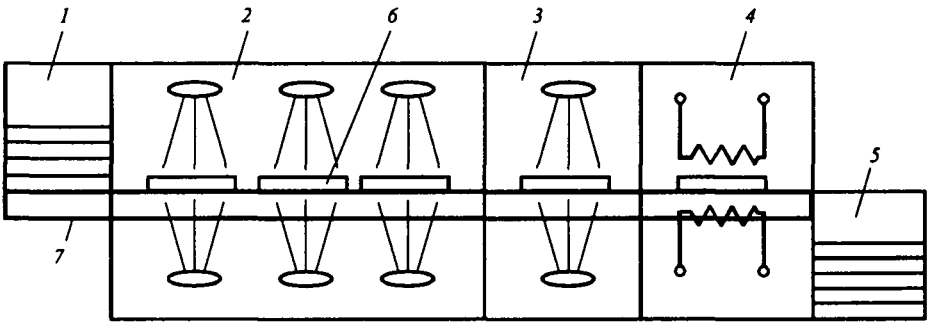


Рис. 8.25. Схема системы модульного травления:

1 — загрузка ПП; *2* — камера струйного травления; *3* — отмывка; *4* — сушка; *5* — разгрузка; *6* — ПП; *7* — конвейер

приводит к зауживанию проводников и нависанию травильного резиста. Эти явления необходимо учитывать при конструировании, в частности, при выборе толщины медной фольги. Применение материалов с тонкомерной медной фольгой (5 мкм) значительно снижает боковое подтравливание.

В качестве *травильных резистов* применяют: краску, которая наносится сеткографическим способом; фоторезист (СПФ или жидкий) — фотохимический способ нанесения; металлорезист (олово-свинец, олово, свинец, золото и др.), который наносится электрохимическим способом.

Заготовки ПП размещают на установки струйного травления, в которых участки меди, незащищенные травильным резистом, вытравливаются электролитом, и на заготовках остаются только токопроводящие участки в соответствии с фотошаблоном или трафаретом. В качестве травящего электролита широко применяют кислые и щелочные растворы хлорной меди, растворы на основе хлорного железа, растворы на основе персульфата аммония, железо-медно-хлоридные растворы. Процесс травления происходит, как правило, в специальных модульных установках, устройство которых схематически приведено на рис. 8.25. В модулях щелочного травления осуществляется автоматический контроль величины pH раствора, а в модулях кислотного травления производится регенерация раствора на основе хлорида меди.

Оплавление

При проведении операции оплавления осуществляется: превращение пористого гальванического покрытия олово-свинец (ОС) в мелкозернистое покрытие; защита боковых стенок проводников от коррозии и электрокор-

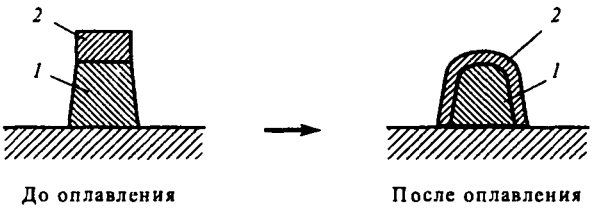


Рис. 8.26. Печатный проводник до и после выполнения операции оплавления:
1 — проводник; *2* — сплав олово-свинец

розии; повышение коррозионной стойкости покрытия; повышение способности к пайке и увеличение срока сохранения паяемости ПП; устранение «навесов» металла по кромкам проводников; исключение из технологического процесса операции горячего облуживания. На рис. 8.26 представлен печатный проводник до и после выполнения операции оплавления.

Применяют жидкостное или инфракрасное (ИК) оплавление. ИК-оплавление экологичнее, пожаробезопаснее и чище жидкостного оплавления.

Обработка по контуру

При выполнении этой операции удаляется технологическое поле, ПП приобретает размеры, заданные в конструкторской документации. Обработка по контуру осуществляется штамповкой, фрезерованием; обработкой дисковой или алмазной пилой; лазерной обработкой (для прецизионных ПП).

Гетинакс и стеклотекстолит штампуют, как и при получении заготовок ПП с подогревом или без него. Предельная толщина заготовок, штампуемых без подогрева: гетинакс всех марок при вырубке ПП простой формы — 1,5 мм, сложной формы — 1 мм; стеклотекстолит всех марок при вырубке ПП простой формы — 2 мм, сложной формы — 1,5 мм. При толщине материала, превышающей указанную, необходим подогрев заготовок.

Фрезерование по контуру ПП применяют для обработки контура сложного профиля и в случаях, когда не допускаются сколы и просветления. Фрезерование контура ОПП и ДПП осуществляют в пакете толщиной не более 30 мм, МПП — не более 15 мм в специальных приспособлениях, что позволяет получить более высокую точность по сравнению со штамповкой.

Прессование

Операция прессования, т. е. соединения отдельных сигнальных слоев (односторонних и двусторонних) в монолитную конструкцию при

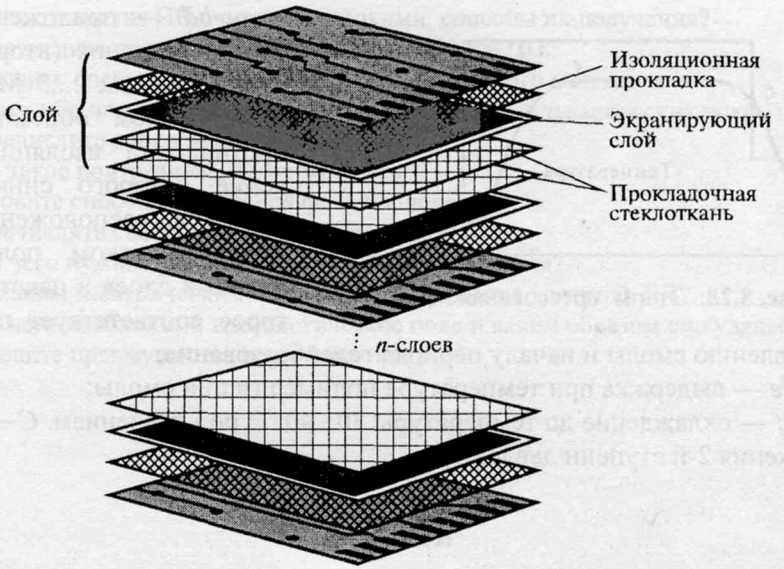


Рис. 8.27. Пакет МПП для прессования

помощи склеивающих прокладок осуществляется в ТП получения многослойных ПП. Прессование всех сигнальных слоев осуществляется одновременно с помощью прокладочной стеклоткани (препрег), пропитанной недополимеризованной термореактивной смолой в пресс-форме. Пресс-форма состоит из двух стальных плит; в нижней плите имеется несколько штырей для фиксации и базирования пакета слоев МПП при прессовании.

Пакет МПП (рис. 8.27) состоит из заготовок сигнальных слоев, переложенных прокладочной стеклотканью, расположенных в середине пакета, а также из нескольких слоев кабельной бумаги и электроизоляционной триацетатной пленки, прилегающих к верхней и нижней плите пресс-формы [30].

В процессе прессования измеряется объемное сопротивление изоляции для определения момента приложения высокого давления (т. е. второй ступени удельного давления). Этот момент соответствует минимальному значению объемного сопротивления диэлектрика, полному расплавлению смолы и началу периода гелеобразования.

Цикл прессования состоит из следующих этапов (рис. 8.28):

ab — нагрев пакета до температуры прессования $T = 175 \pm 5$ °С при низком давлении (первой ступени), равном 0,05...0,1 МПа (датчики контроля температуры расположены в плитах пресса);

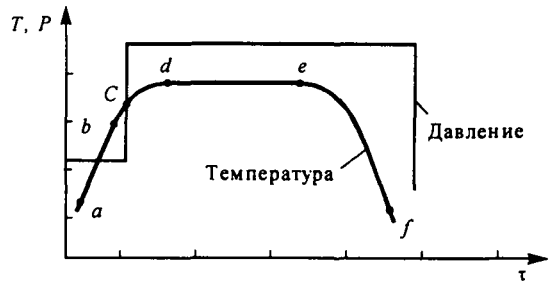


Рис. 8.28. Этапы прессования МПП

bd — приложение высокого давления (вторая ступень), порядка 2...3 МПа при минимальном объемном сопротивлении изоляции, значение которого снимают с датчиков, расположенных на технологическом поле сигнальных слоев в пакете, и которое соответствует полному расплавлению смолы и началу периода гелеобразования;

de — выдержка при температуре полимеризации смолы;

ef — охлаждение до температуры 30...40 °С под давлением. *C* — точка приложения 2-й ступени давления.

Контроль

Операцию контроля ПП проводят с целью проверки целостности проводников, установления наличия коротких замыканий между проводниками, проверки качества изоляции. В мелкосерийном многономенклатурном производстве операцию контроля осуществляют в основном вручную. В серийном и массовом производстве контроль осуществляется на полуавтоматических и автоматических тестовых установках, имеющих оптическую систему контроля и управляемых от компьютера.

Одним из узлов тестовой установки является контактирующее устройство, имеющее верхнее и нижнее поля индивидуально подпружиниваемых контактов, расположенных в каждом узле координатной сетки. Между этими полями контактов размещается контролируемая ПП. С помощью компьютера в таком контактирующем устройстве по программе проверяется весь комплекс контролируемых параметров.

Контрольные вопросы

1. Какие функции выполняет ПП?
2. Перечислите конструктивные характеристики ПП.
3. Как выбирается шаг координатной сетки?
4. От чего зависит ширина проводников и расстояние между ними?
5. Как влияют условия эксплуатации на конструкцию ПП?
6. Перечислите электрические параметры ПП.
7. Назовите способы получения монтажных и переходных отверстий.
8. Назовите оптимальные режимы сверления монтажных и переходных отверстий ДПП.

9. Какие отверстия ПП считают глубокими; способы их получения?
10. Перечислите способы подготовки поверхности ПП.
11. Назовите преимущества и недостатки аддитивного метода.
12. Каким образом можно повысить равномерность гальванических покрытий?
13. Перечислите способы получения рисунка.
14. Что такое подтравливание проводников?
15. Назовите способы получения фотошаблонов.
16. Перечислите способы получения заготовок ПП.
17. Для чего нужны фиксирующие (базовые) отверстия?
18. По каким электрическим параметрам проводится контроль ПП?
19. Для чего необходимо технологическое поле и каким образом оно удаляется?
20. Назовите преимущества рельефных плат.

9. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И ФОРМООБРАЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

9.1. Обработка резанием деталей ЭА

В конструкции современной ЭА используется большое количество разнообразных металлических и неметаллических деталей, выполняющих различные функции: детали, образующие несущую конструкцию ЭА и обеспечивающие устойчивость ее к механическим нагрузкам и климатическим воздействиям; элементы управления, без которых невозможна эксплуатация ЭА; корпусные детали, обеспечивающие эргономические и эстетические характеристики ЭА; детали электромеханических узлов — накопителей на магнитных дисках, датчиков, печатающих устройств, преобразователей, графопостроителей, сканеров и др. На рис. 9.1 приведен внешний вид вычислительно-управляющей системы с входящими в нее устройствами, встроенной в базовый несущий каркас. Из рисунка видно, что данная система состоит из металлических и неметаллических деталей, технологические методы изготовления которых различны и требуют разнообразного технологического оборудования, соответствующей оснастки и приспособлений. К таким методам относятся в первую очередь обработка материалов резанием (механообработка), литье, обработка давлением, электрохимические и электрофизические методы, обработка пластмасс.

Если трудоемкость изготовления ЭА принять за 100 %, то операции механической обработки могут составлять до 15 %, операции литья деталей — до 3 %, операции обработки давлением — до 18 %, операции переработки пластмасс — до 12 %, электрофизические и электрохимические операции — до 5 %, остальное — сборка и монтаж. Рассмотрим в общем виде эти методы обработки материалов и формообразования применительно к технологии производства ЭА.

Обработка металлических и неметаллических деталей для ЭА проводится на различных металлорежущих станках, подразделяемых по степени

автоматизации работы на универсальные станки, полуавтоматические, станки-автоматы, станки с числовым программным управлением, станки типа «обрабатывающий центр». Универсальные станки используют для опытного, ремонтного и мелкосерийного производств, станки-автоматы — для крупносерийного и массового производств. В серийном производстве широко применяют станки с числовым программным управлением (ЧПУ) и обрабатывающие центры.

К методам обработки деталей резанием относятся: *точение, фрезерование, шлифование, сверление, строгание, развертывание, протягивание.* Каждый вид обработки характеризуется достигаемой точностью (табл. 9.1).

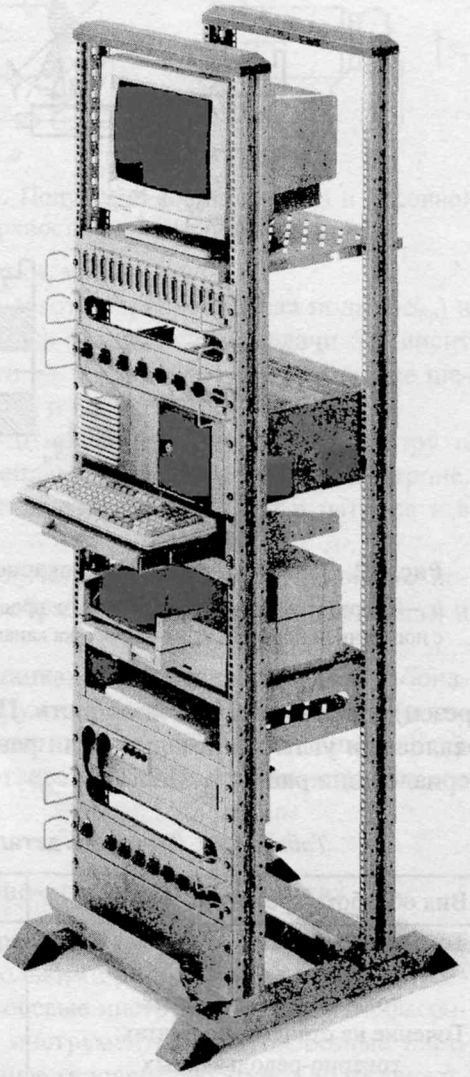


Рис. 9.1. Внешний вид вычислительно-управляющей системы в базовом каркасе

Обработка деталей на токарных станках

Токарные станки предназначены для обработки деталей типа тел вращения, имеющих цилиндрические, конические, фасонные, сферические, винтовые поверхности, а также торцевые плоскости. Это детали типа осей, втулок, роликов лентопротяжных механизмов и т. д. В качестве заготовок таких деталей используют штучные и прутковые заготовки. На рис. 9.2 приведены основные виды работ, выполняемых на токарных станках резцами.

Режущую кромку резца составляет клин (см. сечение I—I на рис. 9.2), который имеет передний γ и задний угол резания α для уменьшения трения по поверхности резания при точении. Чем больше эти углы, тем острее клин

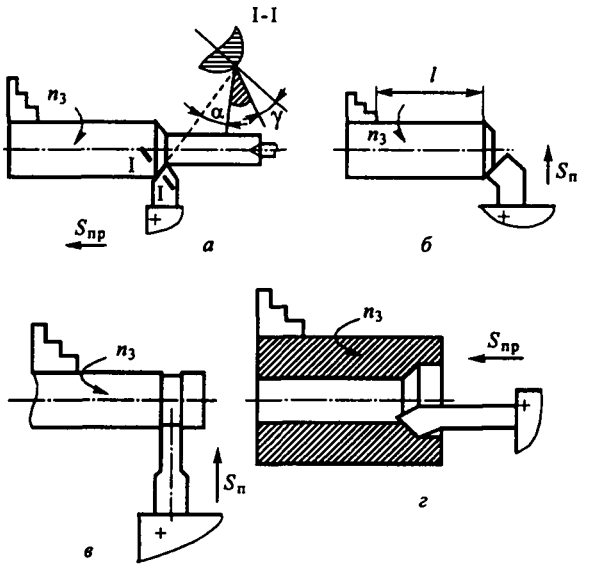


Рис. 9.2. Обработка деталей на токарном станке:

а — обработка проходным резцом с продольной подачей $S_{пр}$; *б* — подрезка торца с поперечной подачей $S_п$; *в* — прорезка канавки и отрезка; *г* — растачивание отверстия

(резец) и тем слабее его прочность. При обработке прочных, хрупких материалов эти углы минимальны или равны нулю, а при обработке мягких материалов они равны 5...15°.

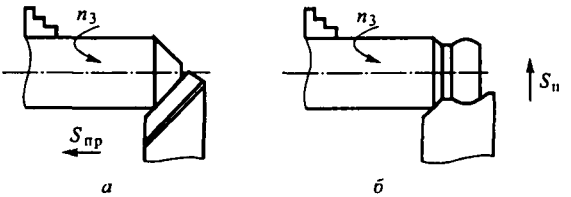
Таблица 9.1. **Точность деталей при обработке резанием**

Вид обработки резанием	Класс точности	Квалитет точности
Точение на станках:		
токарных	2—5	6—12
токарно-револьверных	3—4	8—11
Точение на станках-автоматах:		
токарно-револьверных	3—4	8—11
продольного точения	2—3	6—8
многошпиндельных	4—5	11—12
Фрезерование и строгание	2—5	6—13
Шлифование	1—3	5—8
Сверление	4—5	11—13
Зенкерование и растачивание	2—5	6—12
Развертывание	1—3	5—9
Протягивание	2	6

Заготовка в процессе точения вращается с частотой

$$n_з = \frac{1000v}{\pi d},$$

где v — скорость резания, м/мин, которая зависит от обрабатываемого материала и материала резца; d — диаметр обработки, мм.



а б

Рис. 9.3. Получение конической (*а*) и фасонной (*б*) поверхностей на токарном станке

Резец может перемещаться вдоль заготовки (продольная подача $S_{пр}$) и поперек заготовки (поперечная подача $S_п$). От величины подачи S зависит шероховатость получаемой поверхности — чем меньше S, тем меньше шероховатость и выше качество поверхности и наоборот.

Короткие заготовки, в которых отношение длины l к диаметру d меньше пяти, при обтачивании закрепляют в трехкулачковом патроне. Длинные заготовки (l/d = 5...12) закрепляют в центрах или в патроне и в центре (рис. 9.2, *а*).

На токарных станках можно получать конические и фасонные поверхности. На рис. 9.3 показаны схемы обработки конической (рис. 9.3, *а*) и фасонной (рис. 9.3, *б*) поверхностей.

Нарезание резьбы на токарных станках осуществляется как резьбонарезными резцами, так и *плашками* (наружная резьба) и *метчиками* (внутренняя резьба). Отверстия в цельной заготовке получают сверлением. Если требуется получить после сверления отверстие большего диаметра, то его растачивают специальными резцами.

Обработка деталей на токарно-револьверных станках

Токарно-револьверные станки предназначены для последовательной обработки закрепленной заготовки несколькими разнообразными инструментами. Для обработки применяют резцы, осевые инструменты (сверла), фасонные, комбинированные и специальные инструменты; резьбонарезные инструменты (метчики, плашки, резьбонарезные головки), накатки и др. В качестве заготовки используют прутки различного сечения и штучные заготовки.

Обработка деталей на токарно-револьверных станках ведется по методу автоматического получения размеров, когда станок предварительно настраивают на изготовление определенной детали или группы деталей (при групповой обработке). Настройку проводят с использованием продольных и поперечных упоров. При выполнении каждого перехода необходимо знать длину рабочих ходов инструментов, которая определяется по схеме обработки детали.

Обработка деталей на токарных автоматах

Для изготовления деталей ЭА широко применяют универсальные токарные станки-автоматы: одношпиндельные продольного точения, токарно-револьверные и реже горизонтальные многошпиндельные. Все они предназначены для обработки деталей, имеющих форму тел вращения и требующих большого числа разнообразных режущих инструментов. В основном автоматы предназначены для обработки деталей при крупносерийном и массовом производстве, однако в последнее время широко внедряется групповой метод обработки, который позволяет применять токарные автоматы в серийном и мелкосерийном производстве для обработки небольших партий заготовок. Точность и параметры шероховатости, достигаемые при обработке на станках-автоматах, приведены в табл. 9.2.

Таблица 9.2. **Точность и параметры шероховатости при обработке деталей на токарных станках-автоматах**

Способ обработки	Квалитет точности					*Rz*, мкм				*Ra*, мкм		
	6–7	8–9	10–11	12–13	14	160	80	40	20	2,5	1,25	0,63
Точение и растачивание:												
черновое				X	X	X	X	X				
чистовое		X	X					X	X	X		
тонкое	X	X							X	X	X	X
Сверление			X	X			X	X				
Зенкерование		X	X					X	X	X		
Развертывание	X	X								X	X	

Обработку деталей на *одношпиндельных токарных станках-автоматах продольного точения* осуществляют в крупносерийном и массовом производстве при изготовлении деталей из холоднотянутых калиброванных прутков диаметром 3...25 мм. Автоматы предназначены для обработки методом продольного точения деталей с большим отношением длины к диаметру (рис. 9.4). При сочетании продольной подачи прутка *1* и поперечной подачи инструментов *2*, расположенных на поперечных суппортах, можно обрабатывать детали сложной конфигурации. Продольная подача осуществляется перемещением шпиндельной бабки *3* или пиноли шпинделя. Цилиндрические, конусные, сферические поверхности получают в результате согласованных движений прутка и резцов. Применяя даже один резец, можно получить детали разнообразной формы. Перед резцами устанавливают люнет *4*, воспринимающий усилия резания и обеспечивающий высокую точность обработки.

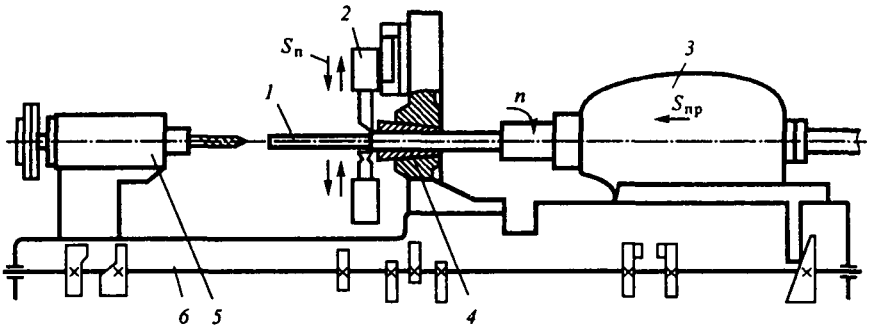


Рис. 9.4. Схема работы токарного станка-автомата продольного точения:
1 — пруток; *2* — суппорты с инструментами; *3* — шпиндельная бабка; *4* — люнет; *5* — дополнительное приспособление; *6* — распределительный вал с кулачками

С помощью дополнительных приспособлений *5* на станках-автоматах можно выполнять сверление, нарезание резьбы, прорезку шлицев. Все рабочие и холостые ходы инструментов осуществляются от кулачков, расположенных на распределительном валу *6*. Станки-автоматы продольного точения выпускаются обычной, высокой и особо высокой точности, которые соответственно обеспечивают следующие квалитеты точности деталей: по диаметру — 9-, 8- и 6-й, по длине — 11-, 9- и 7-й. Параметр шероховатости обрабатываемых поверхностей Ra = 1,25...0,63 мкм.

На рис. 9.5 приведена схема обработки детали на станке-автомате продольного точения. В таких станках пруток имеет левое вращение (по часовой стрелке). Это означает, что невращающейся плашкой можно нарезать только левую резьбу. Правую резьбу нарезают методом обгона. При этом шпиндель резьбонарезного устройства вращается в ту же сторону, что и пруток, но с некоторым обгоном, равным скорости нарезания резьбы. После нарезания резьбы шпиндель резьбонарезного устройства тормозится и происходит автоматическое свинчивание плашки (метчика).

Аналогично при невращающемся шпинделе сверлильного приспособления работу можно проводить левыми сверлами. Если необходимо использовать правые сверла, то шпинделю приспособления сообщают вращение с частотой, превышающей частоту вращения шпинделя автомата с прутком.

На *токарно-револьверных станках-автоматах* изготавливают детали сложной формы по 8—11 квалитету точности с параметрами шероховатости Ra = 2,5...0,63 мкм. Принцип работы токарно-револьверного автомата поясняет рис. 9.6. Заготовка-пруток *1* размещается в шпиндельной бабке *2*, установленной жестко на станине. Шпиндель автомата имеет левое вращение (по часовой стрелке) при обточке и правое вращение (против часовой

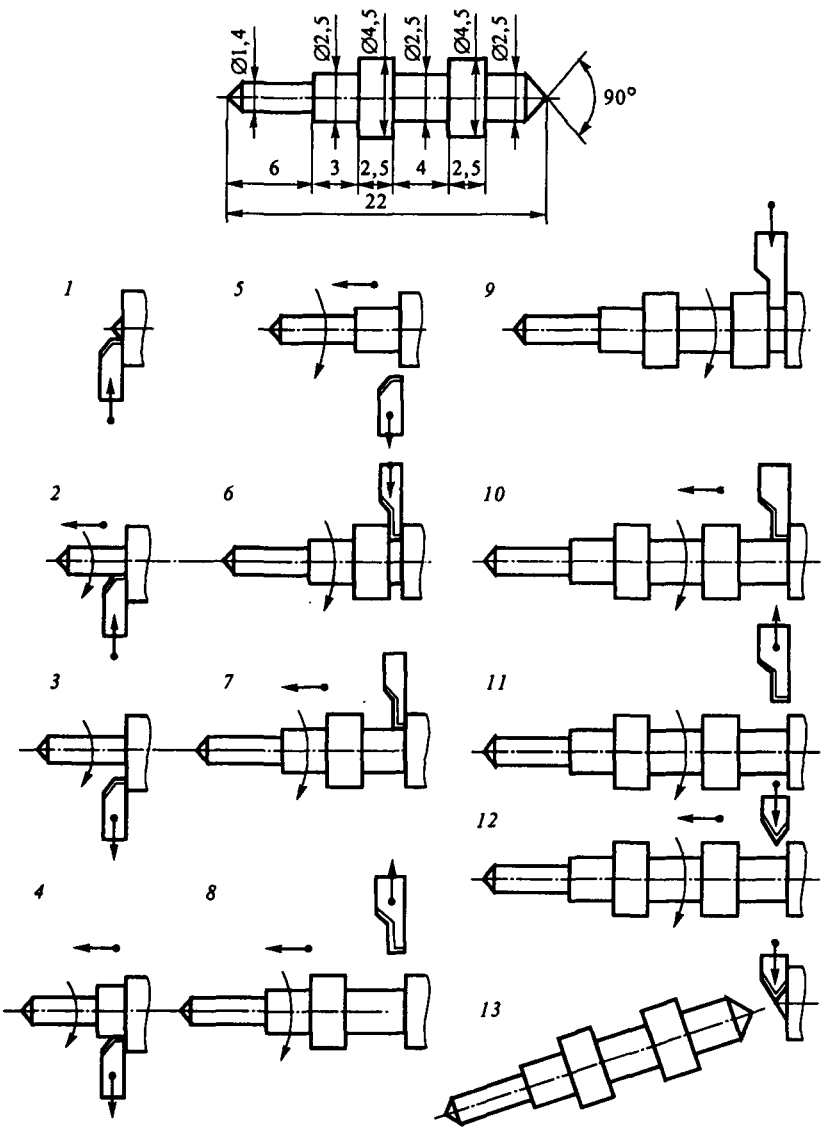


Рис. 9.5. Схема обработки детали на автомате продольного точения:

1 — подвод проходного резца; *2* — обтачивание Ø 1,4; *3* — отвод проходного резца на Ø 2,5; *4* — обтачивание Ø 2,5; *5* — отвод проходного резца; *6* — протачивание канавки; *7* — обтачивание Ø 2,5; *8* — отвод канавочного резца; *9* — протачивание канавки; *10* — обтачивание Ø 2,5; *11* — отвод канавочного резца; *12* — подвод отрезного резца; *13* — отрезка с одновременным получением конических поверхностей

стрелки) при нарезании резьбы невращающимся резьбонарезным инструментом, устанавливаемым в револьверной головке.

Станок-автомат имеет два или три (реже четыре) поперечных суппорта *3*, совершающих поперечную подачу $S_п$, и один продольный револьверный суппорт *5*, на котором установлена поворотная шестипозиционная револьверная головка *4* с инструментами *6* для обработки с продольной подачей $S_{пр}$. В одном гнезде револьверной головки устанавливают упор, до которого подается пруток на необходимую длину, равную длине обрабатываемой детали плюс ширина отрезного резца.

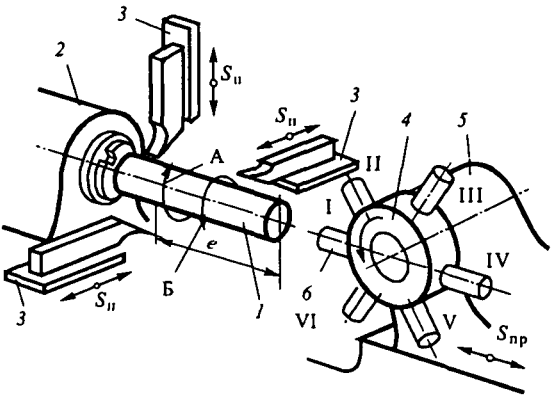


Рис. 9.6. Схема работы токарно-револьверного станка-автомата:

1 — пруток; *2* — шпиндельная бабка; *3* — поперечные суппорты; *4* — револьверная головка; *5* — продольный (револьверный) суппорт; *6* — инструменты

Большинство рабочих операций выполняют при левом вращении шпинделя, а нарезание резьбы, развертывание и некоторые другие операции при более медленном правом вращении. Переключение направлений вращения шпинделя проводится автоматически. Всеми действиями автомата управляют кулачки, установленные на распределительном валу. За один оборот распределительного вала получается готовая деталь. После отрезки детали и отхода отрезного резца проводится быстрая подача прутка до упора, затем последовательная обработка заготовки режущими инструментами, устанавливаемыми в рабочую позицию при периодическом повороте револьверной головки, и инструментами поперечных суппортов.

На рис. 9.7 приведена схема обработки детали на токарно-револьверном станке-автомате. Чертеж обрабатываемой детали размещен в верхней части рисунка.

Обработка деталей фрезерованием

Фрезерованием обрабатывают в основном плоские поверхности, пазы, уступы, фасонные поверхности и канавки, а также отрезают заготовки. Для фрезерования используют универсальные фрезерные станки: вертикально- и горизонтально-фрезерные, продольно-фрезерные; фрезерные станки с ЧПУ для обработки сложных поверхностей; обрабатывающие центры с набором различных инструментов, работающие по программе.

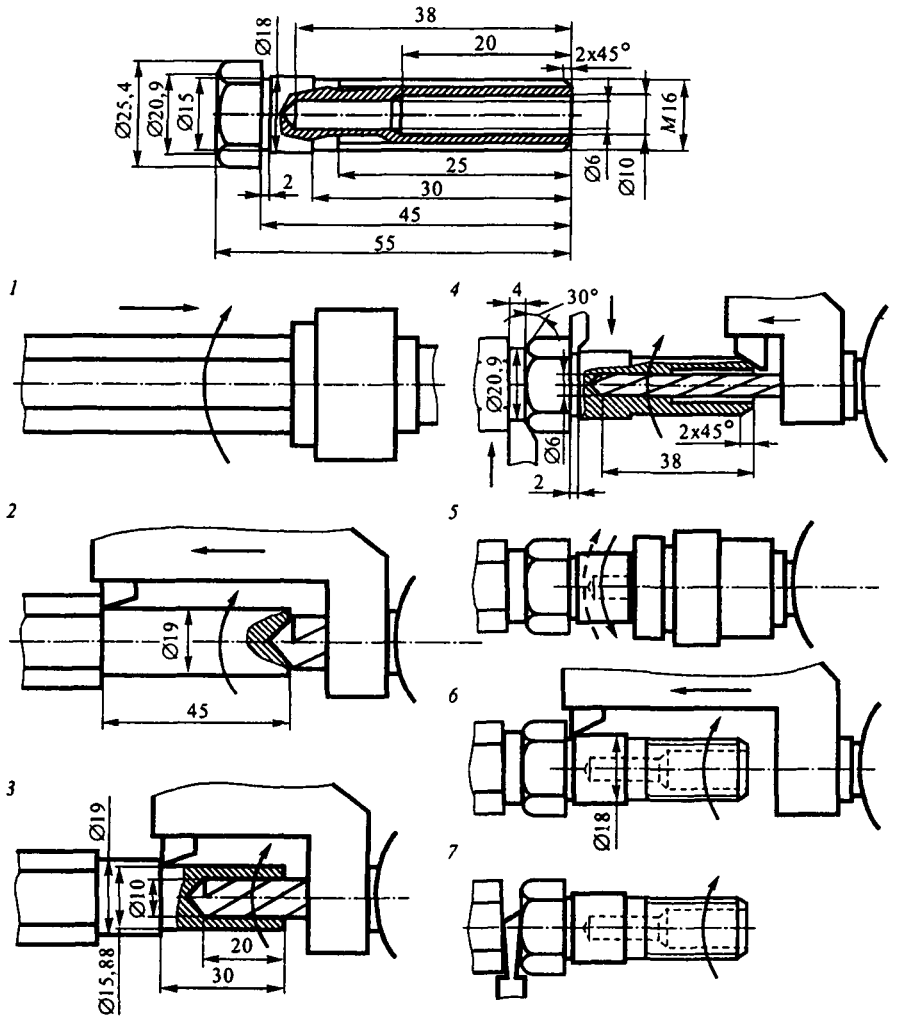


Рис. 9.7. Схема обработки детали на токарно-револьверном станке-автомате:

1 — подача до упора; *2* — обтачивание ∅ 19 и центрование; *3* — обтачивание ∅ 15,88 и сверление ∅ 10; *4* — сверление ∅ 6, снятие фаски и проточка канавки; *5* — нарезание резьбы; *6* — чистовое обтачивание ∅ 18; *7* — отрезка

Инструментом для фрезерования являются фрезы: цилиндрические с прямым и винтовым зубом; торцевые, концевые и фасонные. Цилиндрические фрезы применяют для обработки плоскостей. На рис. 9.8 представлена схема обработки плоскости цилиндрической фрезой с винтовым зубом. Заготовка *2* установлена и закреплена на столе *3* фрезерного станка и подается

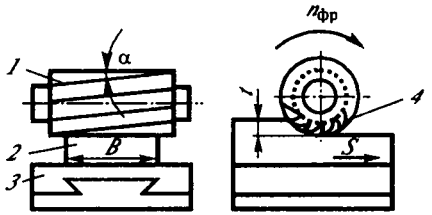


Рис. 9.8. Схема фрезерования цилиндрической фрезой с винтовым зубом

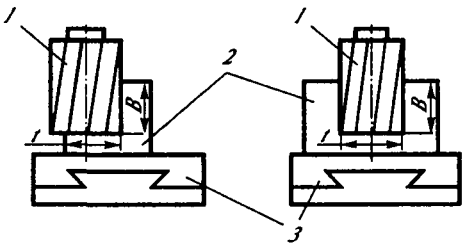


Рис. 9.9. Схемы обработки концевой фрезой

с подачей S на вращающуюся фрезу *1*, которая удаляет слой материала толщиной t. Зубья *4* фрезы располагаются по винтовой линии на поверхности цилиндра под углом α, что обеспечивает равномерное врезание зуба в материал заготовки без удара. Вращение фрезы $n_{фр}$ осуществляется по часовой стрелке (см. рис. 9.8), навстречу подаче заготовки. Такое фрезерование называется встречным. Зуб фрезы в этом случае врезается в материал заготовки с минимальным припуском, что приводит к повышенному износу инструмента. Эту схему рекомендуется использовать для обработки заготовок, имеющих на поверхности корку (окалину).

Если фреза вращается против часовой стрелки, то это будет попутное по отношению к подаче фрезерование. Такую схему рекомендуется применять, если поверхность заготовки чистая, не имеет корки.

Для отрезания заготовок или фрезерования прямоугольных канавок используют цилиндрические фрезы с различной шириной режущей поверхности. Для высокопроизводительной и точной обработки поверхностей применяют торцевые фрезы, имеющие режущие кромки на торце фрезы. Фреза, которая имеет режущие кромки и на цилиндрической, и на торцевой поверхности, называется концевой. Такая фреза универсальна, с ее помощью можно фрезеровать канавки, уступы и пр. (рис. 9.9).

Обработка деталей на сверлильных станках

Обработку деталей на сверлильных станках проводят многолезвийным осевым инструментом: сверлами, зенкерами, развертками. Соответственно названию инструмента называются операции: сверление, зенкерование, развертывание. *Сверлением* получают отверстия в сплошном материале, *рассверливанием* увеличивают диаметр обрабатываемого отверстия до большего, *зенкерованием* повышают качество уже имеющегося отверстия, *развертыванием* осуществляют чистовую обработку отверстия.

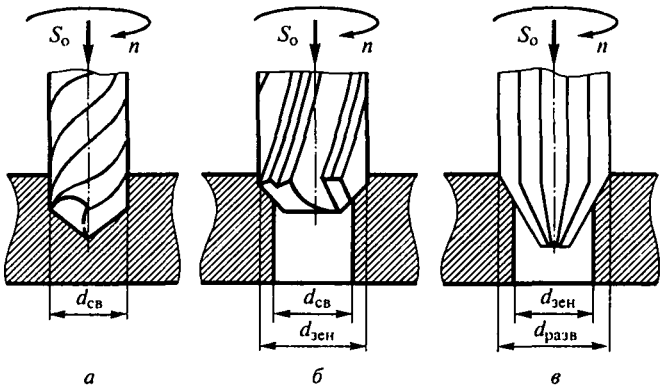


Рис. 9.10. Схемы обработки деталей на сверлильном станке осевым инструментом: *а* — сверление; *б* — зенкерование; *в* — развертывание

На рис. 9.10 приведены основные схемы обработки осевым инструментом на сверлильном станке. Инструмент вращается с частотой n, определяемой по выражению $n = 1000V/(\pi d)$, где V — скорость резания, м/мин; d — диаметр инструмента, мм. Шероховатость получаемых отверстий определяется величиной подачи инструмента (мм/об).

В группу сверлильных станков входят вертикально-сверлильные, горизонтально-сверлильные (агрегатные), радиально-сверлильные, многошпиндельные станки. По назначению и конструкции сверла делятся на спиральные (винтовые), перовые, твердосплавные с прямыми, косыми и винтовыми канавками, сверла для глубокого и кольцевого сверления, центровочные и специальные. Изготавливают сверла из быстрорежущей стали (Р9, Р18 и др.) и твердых сплавов (ВК6, ВК8 и др.).

Обработка деталей шлифованием

Шлифование — процесс обработки металлических и неметаллических материалов абразивным инструментом, режущими элементами которого являются зерна абразивных материалов, связанных друг с другом связующим веществом. Шлифование обеспечивает высокую точность (до 5-го квалитета точности) и 7—12-й классы шероховатости поверхности.

Основными видами шлифования являются: наружное круглое, бесцентровое наружное шлифование, внутреннее и плоское шлифование.

Наружное круглое шлифование в центрáх применяют для обработки цилиндрических поверхностей. Основные методы наружного круглого шлифования — шлифование с продольной и с поперечной подачей.

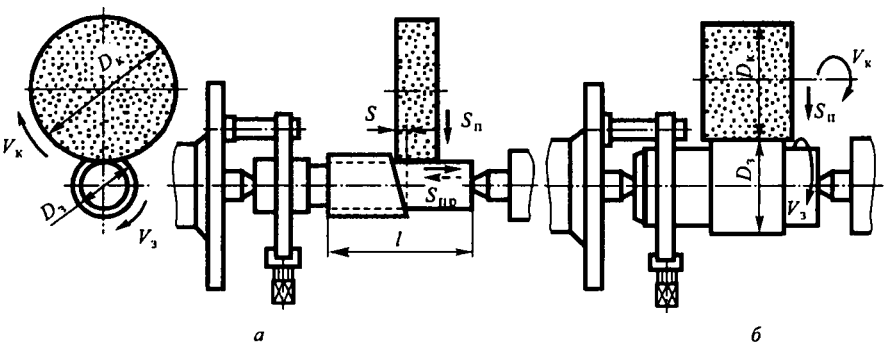


Рис. 9.11. Схемы наружного круглого шлифования

При шлифовании с продольной подачей (рис. 9.11, *а*) шлифовальный круг совершает два движения: вращательное вокруг оси (скорость резания $V_к$) и поступательное в направлении, перпендикулярном к оси обрабатываемой детали (поперечная подача $S_п$). Заготовка тоже получает два движения: вращательное вокруг своей оси со скоростью $V_з$ и поступательное вдоль оси (продольная подача $S_{пр}$).

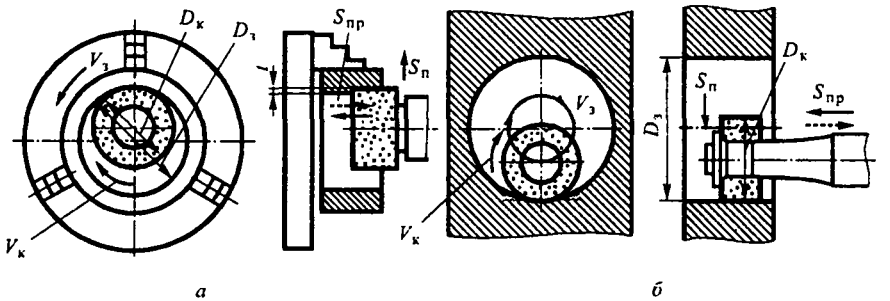
Поперечная подача $S_п$ шлифовального круга осуществляется после возвращения заготовки в исходное положение.

При шлифовании с поперечной подачей или методом врезания (рис. 9.11, *б*) шлифовальный круг и обрабатываемая заготовка имеют вращательное движение. Поперечная подача $S_п$ осуществляется шлифовальным кругом в поперечном направлении перпендикулярно к оси заготовки. Шлифовальный круг перекрывает всю длину обрабатываемой поверхности заготовки.

Шлифовальный круг вращается с окружной скоростью $V_к = 25...30$ м/с. Заготовка, установленная в центрах передней и задней бабок или на оправке, вращается с окружной скоростью $V_з = 5...100$ м/мин в направлении, противоположном направлению вращения шлифовального круга.

Внутреннее шлифование проводят шлифовальными кругами, диаметр которых меньше диаметра заготовки (рис. 9.12). Внутреннее шлифование осуществляют двумя способами: шлифование отверстия во вращающейся детали (рис. 9.12, *а*) и шлифование отверстия в неподвижной детали — планетарное шлифование (рис. 9.12, *б*). Первый способ применяют в основном при обработке отверстий в деталях относительно небольших размеров, имеющих форму тел вращения.

Второй способ применяют при обработке деталей, которые неудобно закреплять в патроне станка. В этом случае шлифовальный круг совершает три движения: вращательное движение вокруг своей оси $V_к$, круговое (пла-

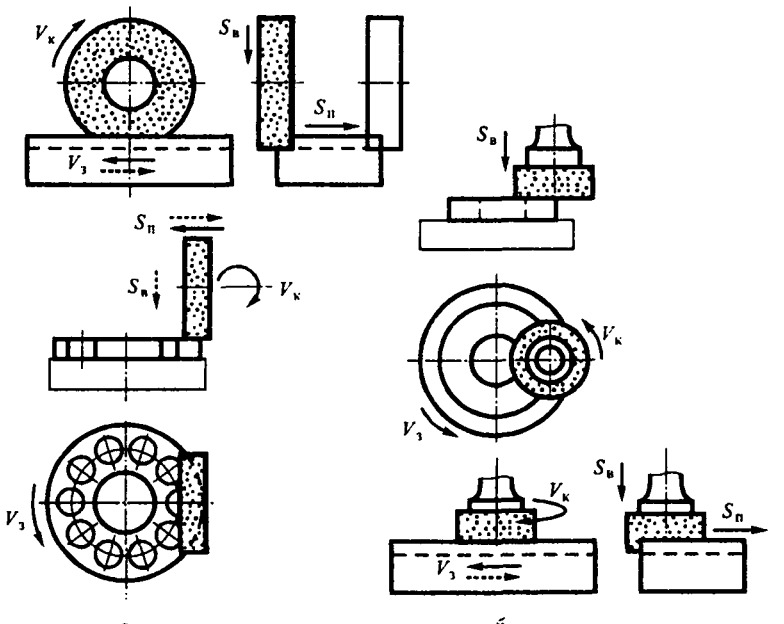


а *б*

Рис. 9.12. Схемы внутреннего шлифования отверстия во вращающейся детали (*а*) и в неподвижной детали — планетарное шлифование (*б*)

нетарное) движение вокруг отверстия заготовки и возвратно-поступательное движение (продольное) $S_{пр}$. Скорость вращения вокруг оси отверстия заготовки представляет собой как бы скорость вращения заготовки $V_з$. Поперечная подача при внутреннем шлифовании осуществляется движением стола станка.

Плоское шлифование является основным методом чистовой обработки плоскостей деталей. Применяют два способа плоского шлифования (рис. 9.13): периферией и торцем круга на станках с прямоугольным и круглым столом.



а *б*

Рис. 9.13. Схемы плоского шлифования:

а — периферией шлифовального круга; *б* — торцем шлифовального круга

При шлифовании на прямоугольных столах деталь совершает возвратно-поступательное движение со скоростью $V_з$, а круг (вращаясь со скоростью $V_к$) — поперечную подачу $S_п$ в конце каждого продольного хода.

Для снятия всего припуска на обработку шлифовальный круг совершает движение вертикальной подачи $S_в$ на глубину шлифования в конце каждого поперечного хода круга.

9.2. Изготовление деталей ЭА методом литья

Литьем изготавливают отдельные детали несущих конструкций, направляющие, корпуса магнитных головок, приводы накопителей на магнитных дисках и др. Литье — наиболее простой и дешевый метод формообразования заготовок. Основным инструментом литейного производства является *форма*. От качества изготовления формы и материала, из которого она изготовлена, зависит качество заготовки (отливки). Формы делятся на разовые, полупостоянные и постоянные. Разовые — на одну отливку, полупостоянные — на несколько, постоянные позволяют получить до нескольких тысяч отливок.

На рис. 9.14 приведен общий вид формы для получения отливок. Две полуформы *1* и *2* образуют полость *3*, в которой образуется отливка. Знак *4* служит для получения углубления в отливке. Штифт *5* центрирует две полуформы при сборке. Отверстие конической формы *6*, называемое литником, служит для заливки расплавленного металла в форму. После застывания металла форму разбирают по плоскости разъема *О–О*, вынимают отливку, затем удаляют литник.

В табл. 9.3 приведены способы литья и их технологические характеристики.

При конструировании литых деталей необходимо учитывать литейные свойства заливаемого металла (сплава): жидкотекучесть, кристаллизацию и усадку. От жидкотекучести во многом зависит минимальная толщина *s* стенок отливки. Кристаллизация (застывание) сплава происходит в направлении, перпендикулярном поверхности теплоотдачи. Скорость кристаллизации меняется от максимальной у поверхности до минимальной в центре отливки, при этом происходит рост кристаллов к центру.

Усадка — свойство металлов (и их сплавов) при охлаждении уменьшаться в объеме.

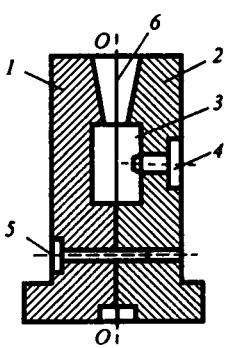


Рис. 9.14. Общий вид формы для отливки деталей:

1, *2* — полуформы; *3* — полость для отливки; *4* — знак; *5* — штифт; *6* — литник

Это необходимо учитывать, обеспечивая отливке плавные переходы от одной стенки к другой, радиусы скруглений, равностенность и т. п. Если этого не учесть, возможны появления трещин, раковин, перекосов стенок. В производстве ЭА широкое распространение получил способ литья под давлением.

Таблица 9.3. **Способы литья и их технологические характеристики**

№ п/п	Способ литья	Материал литьевой формы	Область применения	Тип производства	Точность, шероховатость
1	Литье в землю	Песчано-глинистая смесь, полимер (выжигаемая модель)	Корпусные детали с $S > (5—10)$ мм	Единичное, мелкосерийное	IT 16 $Rz = 80$
2	Литье в оболочковую форму	Песчано-смоляная химически твердеющая смесь	Плоские детали несложной конфигурации	Серийное крупносерийное	IT 12 $Rz = 20$
3	Литье по выплавляемым моделям	Керамика (песок, силикатный клей)	Небольшие детали сложной конфигурации	Массовое	IT 13 $Rz = 20$
4	Литье в полупостоянные формы	Гипс, графит, металлокерамика	Детали простой формы из жаропрочных материалов	Мелкосерийное	IT 14 $Rz = 80$
5	Центробежное литье	Металл	Тела вращения (втулки, шкивы)	Серийное	IT 14 $Rz = 40$
6	Литье в кокиль	Металл	Детали несложной конфигурации с $S = (5—2)$ мм	Серийное, крупносерийное	IT 14 $Rz = 40$
7	Литье под давлением	Металл	Тонкостенные корпусные детали	Серийное, крупносерийное, массовое	IT 12 $Ra = 2,5$ Форма: IT 6 — IT 7
8	Литье вакуумным всасыванием	Металл	Детали сложной конфигурации	Крупносерийное	IT 12 $Ra = 2,5$

Литье под давлением — самый производительный и экономичный способ изготовления тонкостенных деталей сложной конфигурации в серийном производстве. Формы изготавливают из металла высокой прочности, с точностью на 2—3 квалитета выше получаемого квалитета у отливки. Получаемая шероховатость отливок составляет 7—8 класс. Наиболее распространено литье под давлением сплавов на основе цинка, алюминия, магния и меди (латуни). В качестве основного оборудования используют литьевые машины, с горячей камерой прессования, с холодной вертикальной и горизонтальной камерой прессования. Тип машины характеризуется устройством прессующего механизма. В настоящее время используют машины с передачей давления на металл посредством поршня. Такие машины называют поршневыми, они бывают с горячей и с холодной камерой прессования.

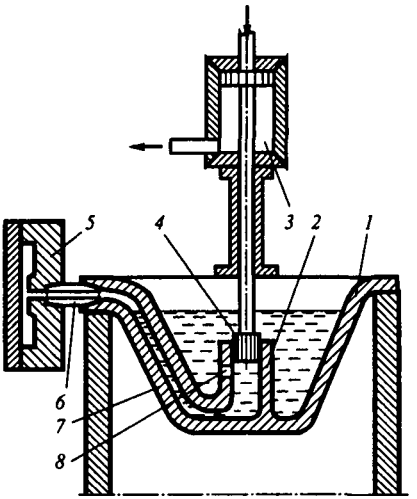


Рис. 9.15. Схема литьевой машины с горячей камерой прессования

Машины с горячей камерой прессования применяют для отливки деталей из цинковых сплавов. Камера прессования таких машин расположена непосредственно в расплавленном металле (рис. 9.15). Металл из раздаточной печи заливается в подогретый тигель *1*. При работе прессующего цилиндра *3* поршень *4* опускается, перекрывает отверстие *8*, через которое расплавленный металл поступает в полость камеры *2*. Под давлением поршня металл поднимается по каналу *7* и через мундштук *6* заливается в форму *5*. Машины с горячей камерой имеют гидравлический или пневматический привод, просты по устройству, высокопроизводительны и могут быть полностью автоматизированы.

Схема действия литьевой машины с вертикальной камерой прессования приведена на рис. 9.16. После заливки расплавленного металла в камеру прессования *2* поршень *1* опускается и, надавливая на основание *4*, открывает литниковое отверстие. Металл заливается в форму *3*. Когда он затвердеет, основание *4* поднимается и срезает остаток *5*, освобождая выход отливки *6* вместе с литником.

В литьевых машинах с горизонтальной камерой прессования (рис. 9.17) литниковая система более короткая, в таких машинах меньше потери тепла и давления при подаче расплава из камеры прессования в полость формы. Расплавленный металл заливается в горизонтальную камеру через отверстие

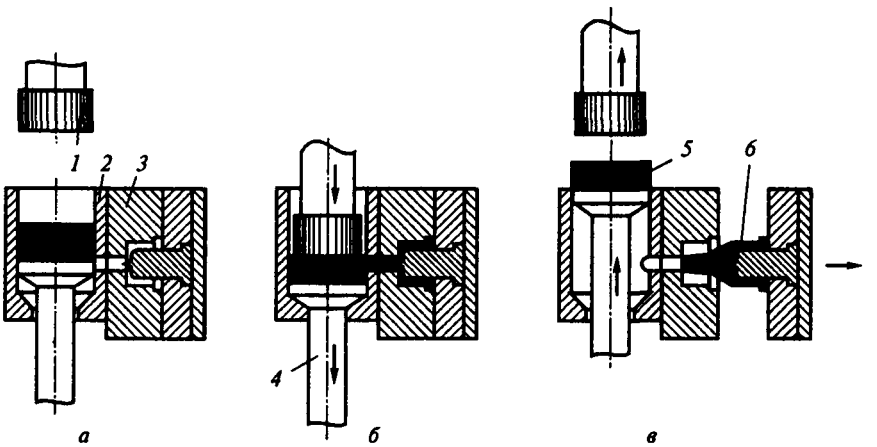


Рис. 9.16. Схема литьевой машины с холодной вертикальной камерой прессования: *а* — заливка; *б* — прессование; *в* — раскрытие формы

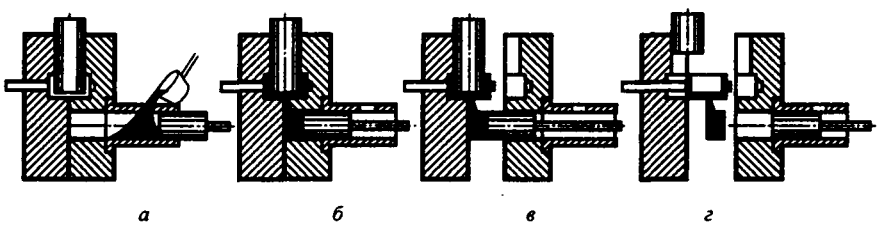


Рис. 9.17. Схема литьевой машины с горизонтальной камерой прессования

(рис 9.17, *а*) и под действием поршня запрессовывается в форму (рис. 9.17, *б*). При раскрытии формы остаток металла остается на плоскости разъема (рис. 9.17, *в*). После полного выхода поперечного стержня отливка вместе с литником и остатком выталкивается из подвижной половинки формы (рис. 9.17, *г*).

9.3. Изготовление деталей ЭА холодной штамповкой

Холодная штамповка — высокопроизводительный, малоотходный и довольно точный метод формообразования деталей ЭА. Этим методом изготавливают каркасы, направляющие в каркасах, пластины магнитопроводов, клеммные зажимы и многие другие детали. Исходными материалами для холодной штамповки являются листы, полосы, ленты из черных и цветных металлов, неметаллических материалов (картон, резина, фибра, текстолит). Предварительно исходный материал раскраивают, размещая будущие детали с наименьшими отходами (рис. 9.18).

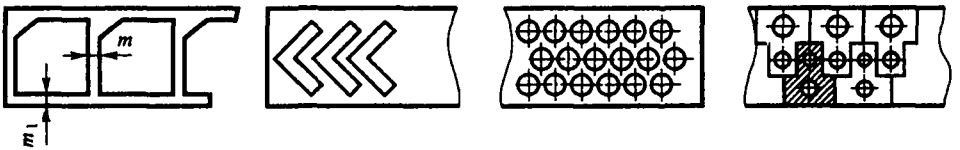


Рис. 9.18. Виды раскроя материала перед штамповкой

Операции холодной штамповки можно разбить на две основные группы: разделительные и формообразующие. К разделительным операциям относятся: отрезка, вырубка, пробивка, надрезка, просечка, зачистка, калибровка; к формообразующим — операции, в результате которых происходит изменение формы и размеров заготовки. Это гибка, вытяжка, правка (рихтовка), формовка, холодное выдавливание.

Отрезка — отделение одной части материала от другой по незамкнутому контуру. Эта операция проводится на ножницах или в штампах. Для отрезки листового материала используют гильотинные, роликовые и вибрационные ножницы (рис. 9.19). Гильотинные и роликовые ножницы с прямо поставленными ножами применяют для прямолинейной отрезки, а роликовые с наклонно поставленными ножами и вибрационные ножницы — для криволинейной резки и вырезки деталей (заготовок) с замкнутым контуром.

Отрезку металлов за исключением магния и титана марки ВТ6 толщиной более 1,5 мм проводят в холодном состоянии. Неметаллические материалы типа гетинакса, текстолита, оргстекла перед отрезкой следует нагревать в печах инфракрасного облучения; резину, фибру, картон — увлажнять.

Вырубка и пробивка предназначены для получения деталей по внешнему контуру и отверстий в детали. Основным инструментом являются штампы, которые отличаются расчетом размеров матрицы и пуансона (рис. 9.20). При вырубке (см. рис. 9.20, *а*) детали *1* из полосы *2* толщиной h, размером $D - \delta_D$, размеры матрицы *3* и пуансона *4* определяют по формулам соответственно:

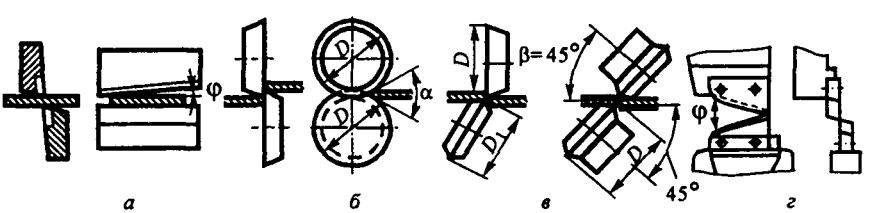


Рис. 9.19. Схемы ножниц:

а — гильотинные; *б* — дисковые с прямо поставленными ножами; *в* — дисковые с наклонно поставленными ножами; *г* — вибрационные

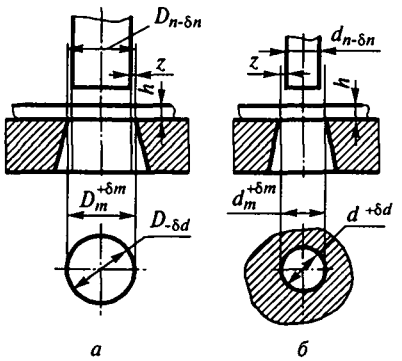


Рис. 9.20. Вырубка детали диаметром D (*а*) и пробивка отверстия диаметром d (*б*)

$$D_м = (D - \delta_D)^{+\delta_м};$$

$$D_п = (D - \delta_D - z)_{-\delta_п};$$

где δ_D — допуск на размер детали; $\delta_м$ — допуск на изготовление матрицы; z — наименьший зазор между матрицей и пуансоном; $\delta_п$ — допуск на изготовление пуансона.

При пробивке (см рис. 9.20, *б*) отверстия размером $d^{+\delta_d}$ размеры пуансона и матрицы определяют по формулам:

$$d_п = (d + \delta_d)_{-\delta_п};$$

$$d_м = (d + \delta_d + z)^{+\delta_м}.$$

Усилие при вырубке и пробивке рассчитывают по выражению

$$P = Lh\sigma_b,$$

где L — длина реза, мм; h — толщина вырубаемого материала, мм; σ_b — предел прочности материала, кг/мм^2.

Штампы для вырубки деталей из неметаллических материалов (резина, картон, кожа) имеют свои особенности. На рис. 9.21 показан вариант рабочей части штампа для вырубки. Деталь *1* в виде шайбы вырубается из заготовки кольцевыми пуансонами, внешний диаметр шайбы оформляется пуансоном *3*, внутренний — пуансоном *4*. Матрица в этом случае отсутствует, ее роль выполняет подкладка *5* из неметалла, чтобы не затупились острые кромки пуансонов. После вырубки и подъема пуансонов деталь выталкивается кольцевым выталкивателем *6* под действием пружины сжатия *7*. Отход выталкивается выталкивателем *8*.

Гибка — операция по изменению положения одной части листа (полосы) относительно другой под определенным углом. Операция гибки широко применяется при изготовлении деталей несущих конструкций ЭА. Широко применяются следующие виды гибки: свободная, гибка с поджимом и гибка с калибровкой.

На рис. 9.22 схематически представлена операция свободной гибки. Оформление детали *1* осуществляет пуансон *2*, матрица *3* выполняет роль опорного элемента. Линия *О—О* — нейтральная линия

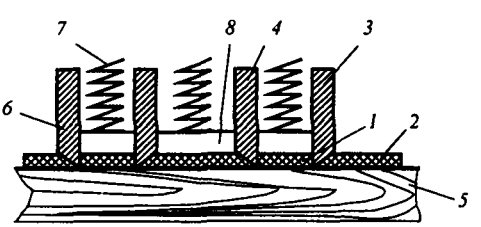


Рис. 9.21. Схема вырубки детали из неметаллического материала

гиба. Со стороны матрицы от нейтральной линии материал детали испытывает напряжение растяжения, со стороны пуансона — сжатия. Поэтому первоначальная форма сечения детали деформируется и имеет форму, показанную в сечении *А—А*. Чем толще изгибаемый материал, тем больше деформируется сечение.

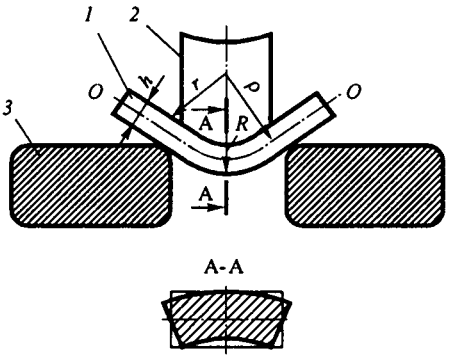


Рис. 9.22. Свободная гибка детали

Максимально допускаемый радиус определяется по выражению $R_{min} = kh$, где h — толщина изгибаемого материала; k — коэффициент, зависящий от физических свойств материала ($k = 0{,}2 \ldots 0{,}3$ — если линия гиба располагается поперек направлению проката материала; $k = 1{,}5$ — если линия гиба вдоль проката).

На рис. 9.23 приведены схемы гибки с прижимом и с калибровкой. Наличие прижима обеспечивает гибку детали с равными плечами, т. е. заготовка не смещается в процессе гибки.

В схеме гибки с калибровкой форма гиба детали *1* обеспечивается как пуансоном *2*, так и матрицей *3*. Это самый точный способ гибки деталей.

Вытяжка предназначена для получения полых деталей замкнутого профиля: цилиндрических, конических, ступенчатых, с фланцем и без него (рис. 9.24). Вытяжкой изготавливают детали типа крышек и корпусов различных элементов и узлов. Различают вытяжку без утонения, когда толщина исходного листа (заготовки) практически не изменяется после вытяжки, и с утонением. Для вытяжки используют пластичные листовые материалы — малоуглеродистые стали, цветные металлы и их сплавы.

Рассмотрим схему процесса вытяжки на примере формирования цилиндрического колпачка с фланцем (рис. 9.25). На матрицу *1* устанавливается заготовка *3* в виде круглой шайбы. Перед вытяжкой для уменьшения

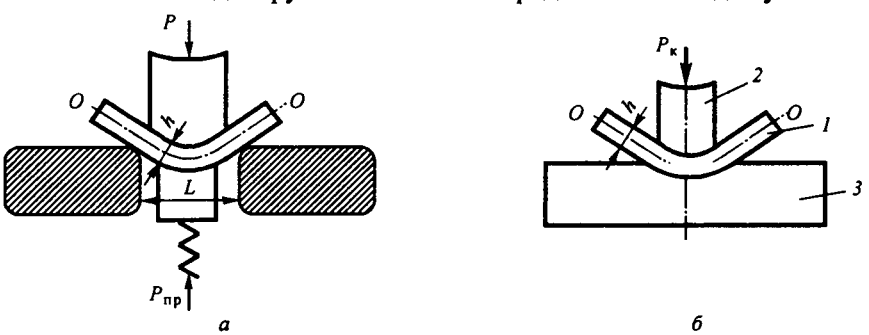


Рис. 9.23. Схемы гибки с прижимом (*а*) и с калибровкой (*б*)

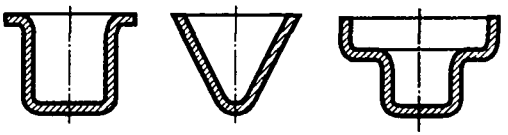


Рис. 9.24. Варианты деталей, получаемых вытяжкой

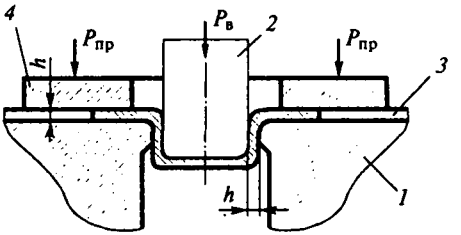


Рис. 9.25. Схема вытяжки детали

трения заготовку смазывают солидолом, смазкой на основе графита и др. Иногда для ответственных деталей поверхность заготовки покрывают более пластичным материалом, например, меднением поверхности стали. Пуансон *2*, проталкивая заготовку через матрицу с закругленными кромками, вытягивает деталь. Чтобы вытягиваемый материал не гофрировал, его прижимают кольцевыми прижимами. При проталкивании заготовки пуансоном полностью через матрицу получим полую деталь без фланца, не полностью — деталь с фланцем.

Холодное (ударное) выдавливание применяют для деталей типа приведенных на рис. 9.26. Это — различного рода втулки, радиаторы охлаждения элементов, детали разъемов, корпусы конденсаторов, экраны и т. д.

Процесс выдавливания протекает с большими пластическими деформациями, материал течет под большим давлением, следовательно, он должен обладать хорошей пластичностью, поэтому чаще всего используют алюминий, медь и их сплавы. Процесс холодного выдавливания выполняется по трем схемам: прямое, обратное и комбинированное выдавливание.

На рис. 9.27 приведена схема обратного холодного выдавливания. Материал заготовки течет в зазор между пуансоном *1* и матрицей *2* обратно движению (удару) пуансона.

В случае прямого выдавливания (рис. 9.28) материал течет в направлении движения пуансона. Размер заготовки определяют по критерию равенства объемов заготовки ($V_з$) и детали ($V_д$) с учетом отходов ($V_{отх}$)

$$V_з = V_д + V_{отх}.$$

Тогда толщина заготовки

$$h_з = V_з/F_з,$$

где $F_з$ — площадь заготовки, определяемая по выражениям: для обратного выдавливания — $F_з = \pi d^2/4$;

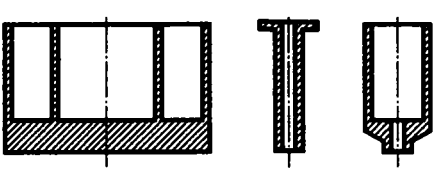


Рис. 9.26. Примеры деталей, получаемых методом холодного выдавливания

для прямого с отверстием — $F_з = (\pi D_д^2/4) - (\pi d_д^2/4)$.

9.4. Изготовление деталей из пластмасс для ЭА

Пластические массы (пластмассы) широко используются при производстве ЭА. Из них изготавливают корпусные детали, несущие конструкции, клавиатуру, диэлектрические платы, опоры и др. Такие изделия легки, хорошо противостоят коррозии, обладают высокими электроизоляционными свойствами, имеют эстетичный внешний вид. На рис. 9.29 приведены примеры деталей из пластмасс с различным конструктивным исполнением.

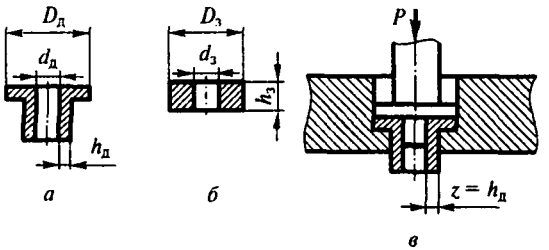


Рис. 9.27. Обратное холодное выдавливание:

а — деталь; *б* — заготовка; *в* — схема обратного холодного выдавливания

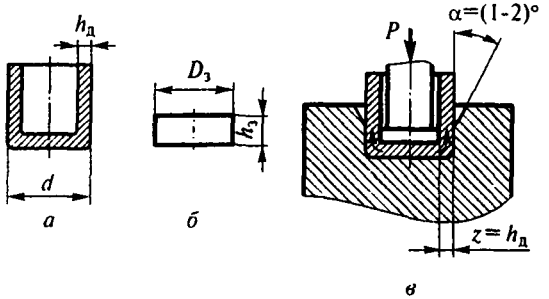


Рис 9.28. Прямое холодное выдавливание:

а — деталь; *б* — заготовка; *в* — схема прямого выдавливания; *1* — пуансон; *2* — матрица

Детали из пластмасс должны быть по возможности равностенными и, где это возможно, с ребрами жесткости. В противном случае возникают трудности с ликвидацией коробления и трещин. Часто используют армирование пластмассовых изделий, например разъемы, распределительные колодки. Пластмассовые детали можно выполнять с резьбой, для чего используют резьбовые знаки, которые после затвердевания пластмассы вывинчиваются из детали.

Основной составной частью пластмасс являются полимеры — синтетические органические соединения. Иногда пластмасса полностью состоит из полимера, но чаще всего она представляет собой сложную комбинацию из полимера, пластификатора, наполнителя и красителя. В некоторых случаях добавляются катализаторы и стабилизирующие компоненты. Наполнители, в качестве которых используют древесную муку, тальк, каолин, асбест, стекловолокно, хлопчатобумажные, синтетические, стеклянные ткани, древесный шпон, придают изделиям необходимые прочность, жесткость, теплостойкость и электроизоляционные свойства.

Широко распространенными материалами для изготовления пластмасс являются фенолформальдегидные, эпоксидные и полиэфирные смолы.

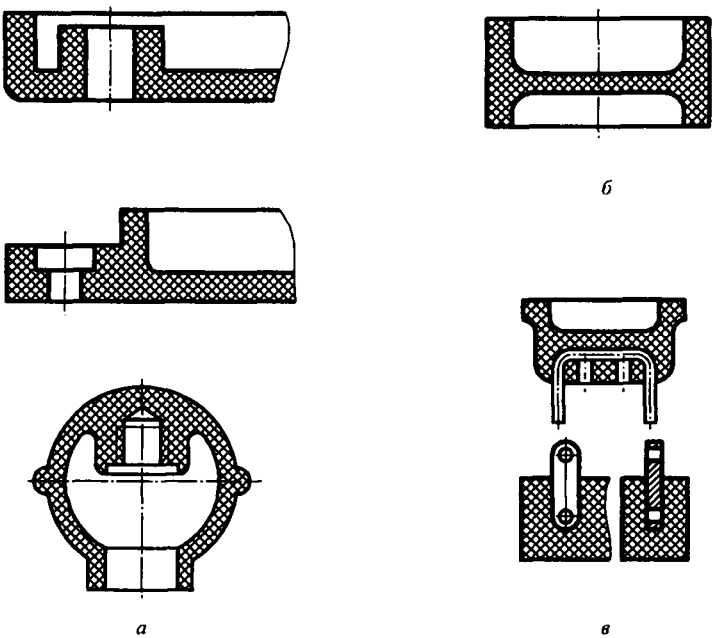


Рис. 9.29. Примеры деталей, изготовленных из пластмасс:
а — равностенные; *б* — равностенные с ребрами жесткости; *в* — армированные

Наибольшую прочность обеспечивает наполнитель в виде стеклоткани (стеклотекстолиты).

В соответствии с изменениями, претерпеваемыми пластмассами при нагревании в процессе переработки, они делятся на две группы:

термореактивные (реактопласты), образующие после первого нагрева неплавкие продукты и поэтому называемые необратимыми;

термопластичные (термопласты), способные неоднократно плавиться в процессе нескольких переработок и поэтому называемые обратимыми.

Основными способами изготовления пластмассовых деталей являются литье под давлением и прессование. Изделия, полученные этими способами, имеют чистую поверхность, точные размеры и не требуют дальнейшей механической обработки.

Для получения крупногабаритных корпусных деталей применяют способы дутьевого и вакуумного формования из листовых термопластических заготовок.

Литье под давлением является наиболее эффективным и производительным способом серийного и массового производства деталей в основном из термопластичных пластмасс. Термопласты для литья под давлением вы-

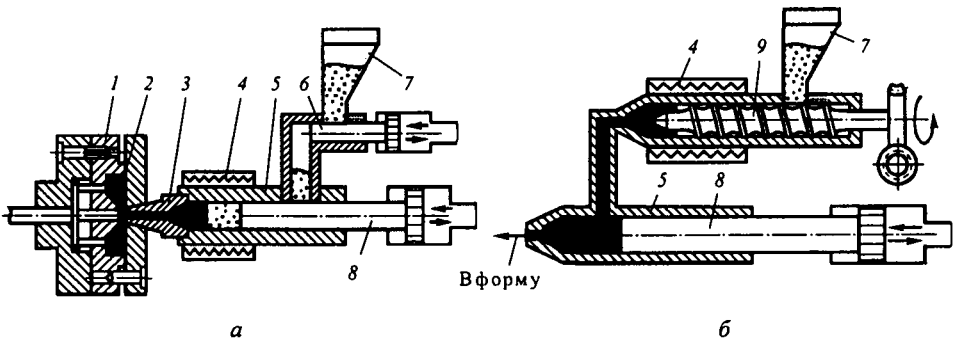


Рис. 9.30. Схемы машин для литья под давлением:
а — без предварительной пластификации; *б* — с предварительной пластификацией

пускаются химической промышленностью в виде гранул и порошков. Детали отливаются из полиэтилена, полистирола, капрона, полиамидов и других материалов.

Литье под давлением пластмасс осуществляется по тому же принципу, что и литье металлов. На рис. 9.30 приведены схемы литьевых машин, работающих без предварительной пластификации (рис. 9.30, *а*) и с предварительной пластификацией (рис. 9.30, *б*). В машине без предварительной пластификации материала гранулированное сырье из бункера *7* подается плунжером *6* в цилиндр *5*, который имеет электронагреватель *4*. При движении прессующего поршня *8* порция сырья подается в зону обогрева, а порция уже расплавленного или, как называют, пластифицированного материала через сопло *3* и литниковые каналы поступает в полость формы *1*, где формуется деталь *2*.

Для повышения однородности заливаемого материала применяют машины с предварительной пластификацией, в которых подача и перемешивание материала осуществляется в отдельном нагревательном цилиндре с помощью шнека *9*.

Большое значение для получения качественных деталей имеет выбор температурного режима литьевого цикла. Температура формы обычно поддерживается на уровне 40...60 °С. Для предупреждения перегрева форм применяют принудительное водяное охлаждение.

Обычное прессование осуществляют на гидравлических прессах. Прессматериал помещается в полость пресс-формы, нагретой до 150...200 °С, и под действием температуры приобретает пластичность, распределяясь под давлением по оформляющей полости. Для получения деталей из порошковых материалов используют давление 150...200 кг/см^2(15...20 МПа), а из волокнистых материалов — 250...350 кг/см^2 (25...35 МПа). Прессование из

высокопрочных стекловолокнистых материалов типа АГ-4 осуществляют под давлением 400...500 кг/см^2 (40...50 МПа). Время выдержки под давлением составляет 1...1,5 мин на 1 мм толщины детали.

В мелкосерийном производстве используют съемные пресс-формы, сборка которых осуществляется вне пресса. Нагрев таких пресс-форм происходит после установки их на пресс, имеющий специальные плиты обогрева. В массовом производстве применяют стационарные пресс-формы с собственным обогревом, который осуществляется электрическими нагревательными элементами, расположенными в плите обогрева пуансона и в плите обогрева матрицы.

Литьевое прессование по сравнению с обычным имеет ряд преимуществ. Этим способом можно получать детали с малопрочной сквозной арматурой, детали с глубокими отверстиями небольшого диаметра, с различной толщиной стенок. Это объясняется тем, что пресс-материал, проходя через узкое сечение литника, нагревается и поступает в оформляющую полость уже равномерно размягченным.

Пресс-форма для литьевого прессования устанавливается на гидравлическом прессе любой конструкции, так как закрытие загрузочной камеры и заливка пресс-материала в полость матрицы происходит при движении поршня вниз. Наличие верхней загрузочной камеры дает возможность прессовать детали из волокнистых материалов, но требует обязательного вертикального разъема матрицы для удаления литника.

При использовании пресс-порошков можно применять пресс-формы с нижней загрузочной камерой. Закрытие такой пресс-формы происходит при движении вниз верхнего поршня пресса, а заливка материала, предварительно размягченного в загрузочной камере, осуществляется при движении вверх нижнего поршня.

Основным недостатком способа литьевого прессования по сравнению с обычным является повышенный расход материала, так как в загрузочной камере остается часть необратимого пресс-материала.

Дутьевое и вакуумное формование термопластов аналогично процессу листовой штамповки (вытяжке) металлов. Лист термопласта, предварительно нагретый до высокоэластичного состояния, формуют в штампе и, не снимая внешнего усилия, охлаждают, фиксируя приданную ему конфигурацию. Эти способы переработки наиболее широко применяют для изготовления тонкостенных крупногабаритных изделий из органических стекол и винипласта.

Различают дутьевое формование свободное (рис. 9.31, *а*) и направленное (рис. 9.31, *б*), осуществляемое давлением сжатого воздуха. Направленное формование применяют для получения глубоких изделий. Оно отличается от свободного тем, что предварительная вытяжка осуществляется пуан-

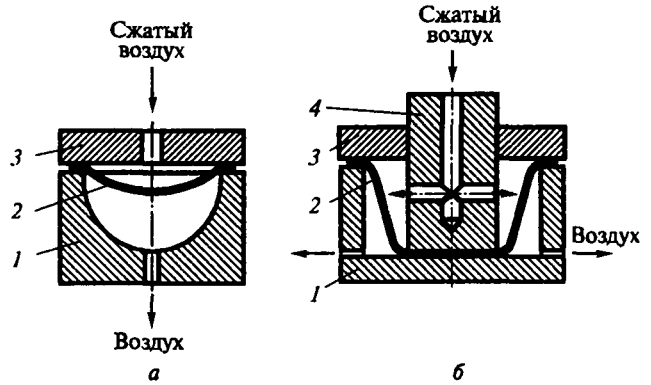


Рис. 9.31. Схема дутьевого формования:

а — свободного; *б* — направленного; *1* — матрица; *2* — изделие в процессе формования; *3* — прижимная плита; *4* — пуансон

соном, через который затем подается сжатый воздух, раздувающий и окончательно формующий изделие.

При вакуумном формовании упрощается конструкция штампа. После разогрева листа *2* специальной плитой обогрева *3* (см. рис. 9.32, *а*) из матрицы отсасывается воздух, и пластмассовый лист всасывается в полость матрицы (см. рис. 9.32, *б*). Затем изделие выталкивается сжатым воздухом (рис. 9.32, *в*). Качество поверхности пластмассовых деталей зависит от качества обработки пресс-форм, штампов и их износа, от вида наполнителя и от технологических режимов формования.

Шероховатость поверхности пластмассовых деталей, изготовляемых литьем под давлением и прессованием, соответствует 7—8-му классам шероховатости. Точность пластмассовых деталей находится в пределах 11—14 квалитета точности, хотя в отдельных случаях достигается 8—9-й квалитет точности.

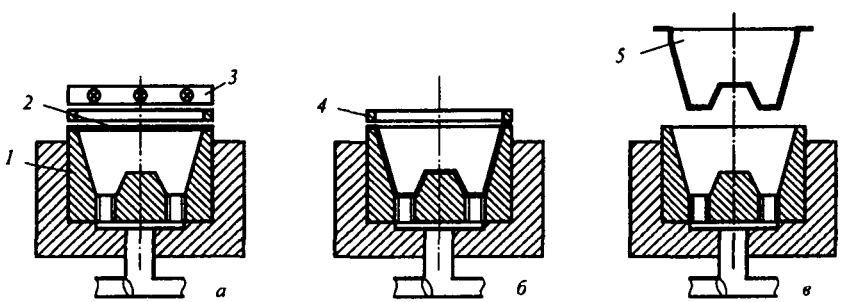


Рис. 9.32. Схема вакуумного формования:

а — разогрев листа; *б* — отсос воздуха; *в* — выталкивание изделия; *1* — матрица; *2* — заготовка; *3* — плита разогрева; *4* — прижимная плита; *5* — изделие

Технологические уклоны (конусность) предусматриваются на внешних и внутренних поверхностях в направлении разъема пресс-форм. Односторонний уклон для внутренних поверхностей составляет от 30' до 1°, а для внешних поверхностей — 15...30'.

9.5. Электрофизические и электрохимичские методы обработки деталей

Электрофизические и электрохимичские методы обработки применяют для обработки труднообрабатываемых, прочных, хрупких и многих других материалов, обработка которых обычными механическими методами затруднена или невозможна. К таким материалам относятся полупроводниковые материалы, кварц, рубин, ферриты, твердые сплавы и др. В зависимости от используемого физического процесса эти методы обработки материалов условно могут быть разделены на ультразвуковые, электроэрозионные, лучевые, электрогидравлические, магнитоимпульсные, электрохимические.

Ультразвуковой метод обработки заключается в механическом воздействии на материал. Он назван ультразвуковым благодаря тому, что частота ударов соответствует диапазону неслышимых звуков, т. е. выше 16 кГц. Ультразвуковым методом можно обрабатывать твердые и хрупкие материалы, частицы которых могут как бы выкалываться при ударе.

Электроэрозионный метод обработки токопроводящих материалов и сплавов основан на использовании преобразуемой в теплоту энергии импульсных электрических разрядов, возбуждаемых между инструментом и изделием. В зависимости от вида электрического разряда (искра, дуга), параметров импульсов тока, напряжения и других условий электроэрозионная обработка подразделяется на электроискровую, электроимпульсную, электроконтактную и анодно-механическую. Каждой разновидности электроэрозионной обработки свойственны определенные технологические характеристики, оборудование и область промышленного применения.

Лучевой метод обработки, к которому относится обработка световым, электронным и ионным лучами, используют для обработки токопроводящих материалов и диэлектриков. Они основаны на съеме материала при воздействии на него сфокусированными лучами с высокой плотностью энергии. Съем материала осуществляется преобразованием этой энергии непосредственно в зоне обработки в теплоту.

Электрогидравлическая обработка материалов представляет собой одну из форм механического воздействия на материал. Интенсивный электрический разряд в жидкости приводит к сильному гидравлическому удару, под воздействием которого обрабатываемый материал может деформиро-

ваться и при известных условиях разрушаться или изменять первоначальную геометрическую форму. Электрогидравлический эффект используется в промышленности преимущественно для дробления крупных материалов, очистки литья от формовочной земли и штамповки.

Магнитоимпульсная обработка материалов основана на использовании энергии сильного импульсного магнитного поля. Особо широкое применение магнитоимпульсная обработка находит для формообразования малопластичных, труднодеформируемых материалов, вырубки и штамповки и многих сборочных операций.

Электрохимические методы обработки материалов основаны на преобразовании электрической энергии в энергию химических связей, т. е. на превращении металла заготовки в легко удаляемые из зоны обработки химические соединения (анодное растворение). Электрохимическая обработка имеет две разновидности: обработка в среде проточного электролита и электроабразивная. В последнем случае происходит комбинированный электрохимический и механический съем металла.

Рассмотрим более подробно электроискровой, ультразвуковой и лучевой методы обработки как наиболее используемые при производстве изделий ЭА.

На рис. 9.33 приведена схема электроискровой обработки, основанная на обработке металлов импульсами электрического тока.

Электрические разряды, которые возникают между двумя электродами, находящимися на небольшом расстоянии друг от друга, разрушают их поверхности. Одним электродом с положительным потенциалом является обрабатываемая заготовка *3*, а другим электродом является инструмент *1*.

Обработка детали заключается в следующем. Конденсатор *C* заряжается через сопротивление *R* от источника постоянного тока напряжением 100...200 В. При достижении на подключенных параллельно конденсатору электродах *1* и *3* напряжения, равного пробойному, образуется канал сквозной проводимости, через который осуществляется разряд всей энергии, накопленной конденсатором. Прохождение тока через эрозионный промежуток прекращается после деионизации объема жидкости *2*, заключенного между электродами.

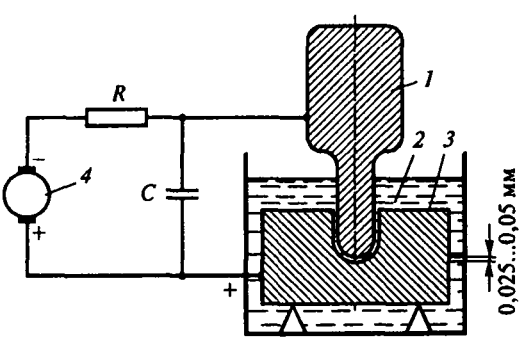


Рис. 9.33. Схема электроискровой установки с генератором:

1 — инструмент-катод; *2* — рабочая жидкость; *3* — обрабатываемая деталь — анод; *4* — источник постоянного тока

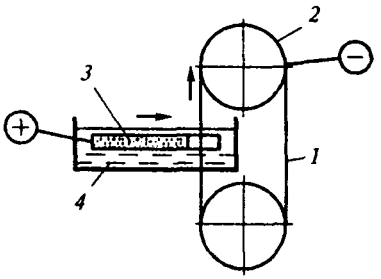


Рис. 9.34. Схема прорезки пазов электродом-проволокой

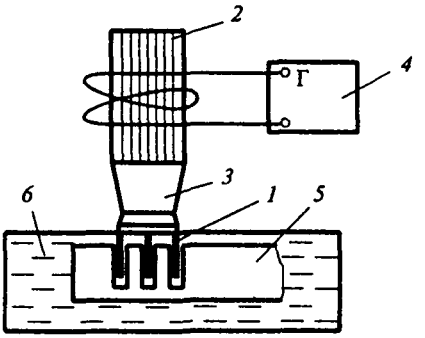


Рис. 9.35. Схема резки полупроводниковых слитков на пластины

Параметры схемы релаксационного генератора существенно влияют на характеристики процесса. При увеличении емкости C запас энергии, накапливаемой в конденсаторе, увеличивается, поэтому увеличивается и объем эрозионной лунки и, следовательно, производительность. Повышение сопротивления увеличивает время зарядки конденсатора и длительность эрозионного цикла. Поэтому для повышения производительности целесообразно уменьшать сопротивление, однако при уменьшении сопротивления ниже определенного значения эрозионный процесс становится неустойчивым вследствие срыва релаксации и перехода в дуговой.

При электроискровом методе обработки применяют импульсы длительностью 20...200 мкс. Электрическая эрозия проявляется наиболее интенсивно, если межэлектродное пространство заполнено диэлектрической жидкостью. В качестве такой жидкости используют керосин, минеральное масло, водные растворы электролитов и дистиллированную воду.

Форма обрабатываемой поверхности (отверстия) зависит от формы электрода-инструмента. Прорезка пазов в материале осуществляется по схеме, представленной на рис. 9.34. Инструментом в такой установке является бронзовая проволока *1* диаметром (0,1...0,15) мм, размещенная на роликах *2*. К проволоке подводится отрицательный потенциал, и она в процессе обработки медленно перемещается, обновляя инструмент относительно заготовки *3*. Заготовка установлена в ванне с диэлектрической жидкостью *4* и к ней подведен положительный потенциал. Заготовка медленно подается на проволочный электрод до появления электроискровых разрядов, которые разрушают материал заготовки. Таким образом получают маски-шаблоны при производстве тонкопленочных микросхем.

На рис. 9.35 приведена схема ультразвуковой размерной резки полупроводниковых слитков *5* на пластины. Ультразвуковая размерная обработка основана на ультразвуковых колебаниях (свыше 16 кГц) инструмента в

среде абразивной суспензии *6*. Обрабатываемый материал выкалывается ударами зерен абразива, получающих ускорение от торца инструмента, колеблющегося с небольшой амплитудой. Обрабатываемый материал должен быть хрупким, а инструмент более мягким (среднеуглеродистые стали).

Инструмент *1* получает ультразвуковые колебания от магнитострикторa *2* через концентратор колебаний *3*. Некоторые материалы, называемые магнитострикционными, под воздействием электромагнитных колебаний от генератора *4* начинают «сжиматься и разжиматься» с той же частотой. Если к торцу магнитострикторa, колеблющегося с ультразвуковой частотой и определенной амплитудой, прикрепить инструмент определенной формы, то можно вести обработку. Для усиления энергии колебаний применяют концентраторы различной конфигурации.

Для повышения производительности суспензию следует прокачивать через зазор между инструментом и обрабатываемым слитком, так как абразивные зерна постепенно разрушаются и их необходимо заменять. В качестве суспензии используют воду с абразивными зернами. Кавитация (схлопывание образовавшихся воздушных пузырьков в жидкой среде) ускоряет процесс обработки.

Широко используют ультразвуковую очистку деталей. Ультразвуковые колебания, накладываемые на жидкость для очистки деталей, особенно малогабаритных и имеющих сложную конфигурацию, резко повышают скорость и качество очистки.

Для пайки алюминия и его сплавов применяют способ удаления окисной пленки, основанный на ее механическом разрушении интенсивными ультразвуковыми колебаниями (рис. 9.36, *а*). При этом осуществляется процесс ультразвукового лужения. Сущность явлений, происходящих при ультразвуковом лужении, заключается в следующем. Излучаемые рабочей частью паяльника знакопеременные упругие колебания частотой 16...22 кГц вызывают периодические растяжения и сжатия частиц жидкого припоя. В результате чего образуются кавитационные процессы в расплавленном припое. При этом возникают большие ударные импульсы, воздействующие на жидкий припой и поверхность облуживаемых деталей и вызывающие разрушение окисной пленки. Раздробленные частицы окисной пленки, обладающие меньшей плотностью, всплывают на поверхность припоя, и он беспрепятственно облуживает очищенную поверхность металла.

Процесс ультразвукового лужения позволяет облудить всю обрабатываемую поверхность, с которой сняты окисные пленки, в то время как при механическом удалении окисной пленки облуживаются только отдельные зачищенные места поверхности.

На частоте 18...23 кГц окисная пленка наиболее эффективно удаляется при интенсивности ультразвуковых колебаний 25...100 Вт/см^2. Зона такой интенсивности из-за относительно высокой вязкости припоя распро-

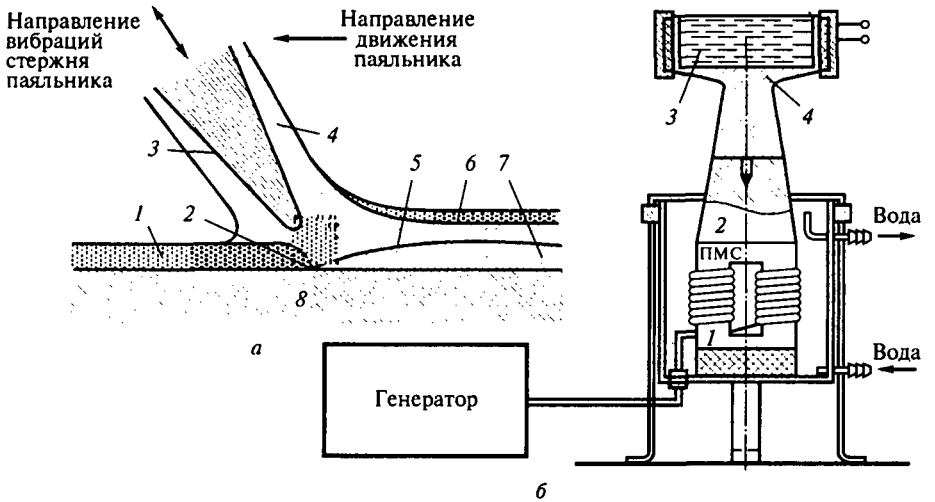


Рис. 9.36. Схема ультразвуковой пайки и лужения:

а — схема пайки: *1* — оксидная пленка; *2* — контакт расплавленного припоя с чистым металлом; *3* — жало паяльника; *4* — расплавленный припой; *5* — затвердевший припой; *6* — остатки окислов; *7* — смешанный слой припоя с чистым металлом; *8* — чистый металл; *б* — схема ванны лужения: *1* — преобразователь; *2* — концентратор-трансформатор скорости; *3* — расплавленный припой; *4* — ванна

страняется от излучающей поверхности преобразователя не далее 3 мм. В этой зоне можно получить эффективное лужение в течение 0,1 с при условии, что поверхность детали была предварительно нагрета до температуры расплавленного припоя.

При уменьшении интенсивности ультразвуковых колебаний продолжительность удаления пленки увеличивается до 1 с. Более длительное воздействие кавитации разрушает поверхности обрабатываемого изделия, а в некоторых случаях приводит к растворению изделия в припое.

Высокая плотность энергии сфокусированного электронного луча так же, как и светового луча лазера, позволяет проводить размерную обработку за счет нагрева и испарения материала с узколокального участка. Для этих методов характерна практическая независимость обрабатываемости материала от механических характеристик, поэтому как металлы, так и неметаллические материалы (магнитные материалы, керамика, полупроводниковые материалы, легированные стали и ферриты, твердые сплавы, корунд и т. д.) обрабатываются одинаково успешно.

Возможность точного дозирования энергии луча позволяет осуществлять широкий круг технологических процессов от местной термообработки, зонной очистки и сварки до механической обработки. В ряде случаев, когда

для обработки особо миниатюрных деталей изготовление инструмента практически неосуществимо (например, для отверстий диаметром 5...10 мкм), лучевая обработка является единственно возможной.

Оба метода позволяют проводить такие операции, как разрезку материалов, получение фасонных поверхностей и т. д. При этом, поскольку инструментом является сфокусированный луч, вопрос об износе инструмента так же, как и об ошибках, связанных с этим износом, полностью снимается.

При обработке электронным лучом расплавление и испарение происходит за счет повышения температуры материала при резком торможении потока электронов в месте встречи его с обрабатываемой поверхностью. Для получения мощного потока электронов электронный пучок, эмитируемый вольфрамовым катодом в электронной пушке, ускоряется напряжением, приложенным между катодом и анодом, юстируется и фокусируется при помощи системы магнитных линз. Стигматор придает лучу круглую форму, а перемещение луча по поверхности изделий осуществляется отклоняющей системой. Кроме того, изделие, закрепленное на координатном столике, само может перемещаться относительно луча. Все устройство находится в вакуумной камере. Энергия луча (в электрон-вольтах) пропорциональна заряду электронов, их количеству и величине ускоряющего напряжения.

Обработка световым лучом имеет ряд преимуществ: для обработки не требуется создания вакуума, при котором значительно труднее управлять технологическим процессом; нет рентгеновского излучения, сопутствующего обработке электронным лучом; лазерные установки конструктивно проще электронных пушек; в некоторых случаях механическая обработка может осуществляться за прозрачной преградой (например, в запаянной колбе).

Главным недостатком обработки световым лучом является отсутствие надежных методов управления движением луча по обрабатываемой поверхности, поэтому при обработке перемещается сама деталь.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные методы формообразования деталей ЭВМ и систем.
2. Какой самый точный и производительный метод литья?
3. Перечислите основные методы холодной штамповки.
4. Какие способы штамповки применяются для получения полых деталей?
5. На какие группы делятся пластмассы?
6. *Перечислите основные способы переработки пластмасс в изделия.*
7. Какие виды обработки выполняются на станках токарной группы?
8. Почему на станках-автоматах продольного точения обрабатывают точные детали с большим отношением длины к диаметру?
9. Какие поверхности обрабатывают фрезерованием?
10. Какую обработку можно осуществлять лазером?

10. СБОРКА И МОНТАЖ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

10.1. Сборочно-монтажные операции

Трудоемкость сборочно-монтажных работ составляет 40...75 % общей трудоемкости изготовления ЭА. Сборочно-монтажные работы усложняются широкой номенклатурой выпускаемой продукции, преобладанием малых по размеру и массе деталей и сборочных единиц, значительным объемом в общей трудоемкости сборки проверочных и регулировочных работ, многообразием технических процессов сборки и электрического монтажа.

Большинство сборочных операций выполняются вручную с использованием простой оснастки. Для повышения производительности, снижения трудоемкости и повышения качества ЭА передовые предприятия применяют средства механизации и автоматизации сборочно-монтажного процесса, гибкие производственные системы.

Основными сборочно-монтажными операциями при производстве ЭА являются: свинчивание (завинчивание), соединение методом пластического деформирования, сварка, пайка, склеивание, намотка, накрутка.

Соединение свинчиванием обеспечивает высокие прочностные характеристики аппаратуры и возможность быстрой разборки. В единичном и мелкосерийном производстве сборку резьбовых соединений проводят в основном вручную при помощи ключей, отверток и других инструментов. В серийном производстве для сборки резьбовых соединений применяют механизированный инструмент (электроотвертки, гайковерты, шпильковерты и т.д.), при этом винты, гайки и шпильки подаются, как правило, вручную. В настоящее время применяют механизированные инструменты с автоматической подачей крепежа. При крупносерийном и массовом производстве резьбовые соединения следует выполнять на специальных автоматах и автоматизированных робототехнологических комплексах.

Соединение методом пластического деформирования имеет несколько разновидностей: склепывание (клепка, расклепка), запрессовка, раз-

вальцовка. Соединение склепыванием применяют для изделий, работающих при высоких температурах и давлениях; для соединения неметаллических деталей с металлическими. Основной деталью соединения является заклепка с полукруглой головкой. Получили распространение более технологичные конструкции заклепок, в частности, трубчатые и полутрубчатые, расклепка и развальцовка которых менее трудоемка.

Основными технологическими переходами при склепывании являются сверление или пробивка отверстий; соединение склепываемых деталей; развертывание соединяемых деталей для обеспечения соосности; установка заклепки; склепывание давлением или ударом. Для выполнения соединения склепыванием используют механические эксцентриковые, пневматические, электромагнитные, вибрационные и другие прессы. В крупносерийном и массовом производстве применяют клепальные полуавтоматы и автоматы, выполняющие пробивку отверстий, вставку заклепок и осадку их головок. Наибольшую производительность обеспечивают роторные многопозиционные прессы.

Соединение деталей запрессовкой проводится в холодном состоянии давлением или ударом. Усилие запрессовки зависит от натяга, материала сопрягаемых деталей, их точности и шероховатости. Основными условиями обеспечения высокого качества сборки запрессовкой деталей с натягом являются точное направление запрессовываемой детали в приспособлении в процессе запрессовки; осевое приложение усилий запрессовки к базовым опорам; создание плавающих опор в приспособлениях для центрирования собираемых деталей; контроль собираемых деталей по погрешности формы; контроль за усилием запрессовки.

Развальцовку применяют для сборки деталей из хрупких материалов. При этом инструменту (вальцовке) помимо осевого перемещения сообщается вращательное.

Пайка — процесс соединения металлических деталей при помощи расплавленного припоя, вводимого в зону соединения деталей. При монтаже ЭА применяют в основном мягкие оловянно-свинцовые припои. Для пайки необходимы флюсы, чтобы защитить основной металл и припой от окисления, растворить образовавшиеся окислы, смочить поверхность металлов и обеспечить лучшее растекание припоя. Используют трубчатый припой с флюсом, который можно дозировано подавать к месту пайки. Пайка твердым припоем обеспечивает высокую прочность швов и применяется для сборки изделий, например волноводов.

В настоящее время используют разнообразные способы пайки: паяльником, погружением, волной припоя, паяльными муфтами, паяльными пастами в термопечах и др. Пайку можно проводить в вакууме, в нейтральной или восстановительной среде, предохраняющей место пайки от окисления, с

наложением ультразвуковых колебаний. Нагрев при пайке осуществляется жалом паяльника, в ваннах, печах, с помощью горелок, токами высокой частоты, на электроконтактных машинах. Перед пайкой необходимо совместить с определенной точностью соединяемые припоем поверхности.

Сварка — процесс получения неразъемного соединения за счет расплавления и совместной кристаллизации двух свариваемых материалов или без расплавления в результате электронного взаимодействия свариваемых материалов. В производстве ЭА применяют сварку электронным и световым лучом, диффузную сварку, термокомпрессионную, ультразвуковую, холодную сварку давлением. Важнейшим направлением совершенствования технологических процессов сварки является их механизация и автоматизация, использование сварочных роботов.

Склеивание — процесс соединения различных материалов с помощью клеев. Склеивание как метод сборки при производстве ЭА находит все большее распространение. Клеящие вещества удерживают соединяемые детали силами адгезии. Склеивание — наиболее рентабельный, а нередко единственный метод соединения разнородных материалов: резины с металлом, пластмассы с металлом, стеклами, ситаллами, керамикой и др. Склеивание является основной операцией в производстве слоистых пластиков, фольгированных диэлектриков, многослойных ПП. С помощью клея можно надежно крепить на платах навесные элементы. Соединения, получаемые склеиванием, обладают теплоизолирующими, звукопоглощающими, демпфирующими свойствами, герметичностью. Склеивание отличается простотой технологии, применяется в поточном производстве и имеет низкую себестоимость сборки.

Намотка — процесс механической или ручной укладки провода на каркас или оправку при изготовлении катушек контуров, обмоток трансформаторов, дросселей, реле, резисторов и других элементов ЭА. Обмотка — конструктивная часть намоточного узла, состоящая из намотанного материала, выводов, отводов, внутренней, промежуточной и внешней изоляции. Намотка — сложная и трудоемкая сборочная операция, включающая несколько технологических переходов. Для повышения производительности и снижения трудоемкости изготовления различных обмоток (особенно в крупносерийном и массовом производстве) в настоящее время разрабатываются и внедряются автоматические намоточные станки, обеспечивающие установку каркасов на оправку, намотку провода на каркас, крепление витков, производство выводов, их зачистку и лужение, съем готовой продукции.

Накрутка — метод получения контактных соединений между жилой (проводником) и штырем с острыми кромками. Проводник накручивается непосредственно на штырь с усилием, равным 70 % предела прочности провода на разрыв. При этом 4—6 витков провода механически закрепляются

на кромках штыря, образуя газонепроницаемое соединение, надежность которого выше паяного. Для накрутки применяют специальные пистолеты и установки с ЧПУ.

Процесс сборки и монтажа с использованием рассмотренных сборочных методов состоит из следующих этапов:

- подача собираемых деталей (элементов) к месту сборки;
- взаимная ориентация (базирование) деталей перед их соединением;
- соединение сборочных элементов в сборочную единицу;
- закрепление сборочных элементов (*сборочной операции*);
- контроль.

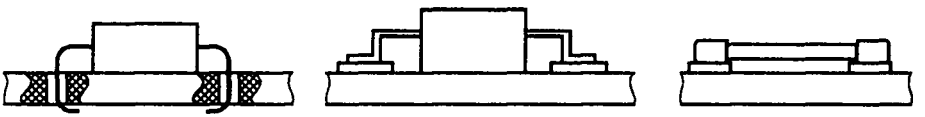
Для выполнения каждого из этапов используют различную *оснастку*. Возможно выполнение всех этапов на многооперационном оборудовании. Важным этапом сборки является ориентация собираемых деталей (элементов) перед их соединением. Необходимая точность взаимного положения деталей определяется многими факторами и может быть рассчитана заранее.

Требования к оснастке в части концентрации операций, автоматизации, многоместности, быстродействия и т. п. во многом определяются объемом выпуска изделий. Для мелкосерийного производства в основном применяют простую однооперационную технологическую оснастку (часто с ручным приводом), универсально-переналаживаемую оснастку, универсальную оснастку с элементами гибкой переналадки. Для серийного производства используют высокопроизводительную механизированную оснастку (с пневмоприводом, гидроприводом, электродвигателем), частично или полностью автоматизированную. Оснастка и технологические модули встраиваются в гибкое производство и предназначены для выполнения нескольких операций. Для крупносерийного и массового производства характерно использование сложной многооперационной, многоместной, как правило, стационарной оснастки, работающей в автоматическом режиме.

10.2. Сборка и монтаж модулей первого уровня

Основным конструктивным элементом, образующим модули первого уровня (ТЭЗ, модули, ячейки) является односторонняя, двусторонняя или многослойная ПП, по одну или обе стороны которой размещаются МС, ЭРЭ, элементы коммутации и пр. Число МС и ЭРЭ, устанавливаемых на плату, может достигать десятков и сотен штук. В зависимости от вида внешних выводов МС и ЭРЭ их монтаж на поверхность ПП делят на штыревой, планарный и поверхностный (рис. 10.1).

Установка МС и ЭРЭ на ПП проводится в зависимости от типа производства ручным, механизированным, полуавтоматическим или автоматиче-



а *б* *в*

Рис. 10.1. Виды монтажа микросхем и ЭРЭ:
а — штыревой; *б* — планарный; *в* — поверхностный

ским способом. Однако вне зависимости от способа монтажа необходимо выполнение следующих операций: комплектация элементов, устанавливаемых на плату, подготовка элементов к монтажу, установка элементов на плату и их фиксация, пайка, защита и контроль готового модуля.

Комплектация устанавливаемых на ПП элементов

Количество различных элементов по номиналам и типоразмерам определяется на основе спецификации, исходя из объема выпуска изделия в течение определенного периода. Закупаемые МС и ЭРЭ складируют на центральном заводском складе, откуда по заявкам их доставляют на цеховой склад или участок комплектации и далее на рабочие места. Комплект элементов на рабочем месте должен обеспечивать односменную или двухсменную работу монтажников. В зависимости от степени развитости производства и объема выпуска предприятие может иметь автоматизированные склады, оснащенные программируемыми устройствами по размещению на стеллажах элементов, их поиску и комплектованию для различных сборочных цехов. Современный сборочно-монтажный цех оборудован, как правило, программируемым магазином-складом, в состав которого входит накопитель *1* элеваторного типа (рис. 10.2), в котором компоненты *2* по программе и в необходимом количестве размещаются в ячейках. Количество ячеек на одной полке *3* может достигать десяти. Полки закрепляются в виде люльки на цепном конвейере *4*. Управление загрузкой и выгрузкой накопителя необходимыми компонентами осуществляется по программе от устройства управления *5*. Если сборочный цех получил задание на сборку различных печатных

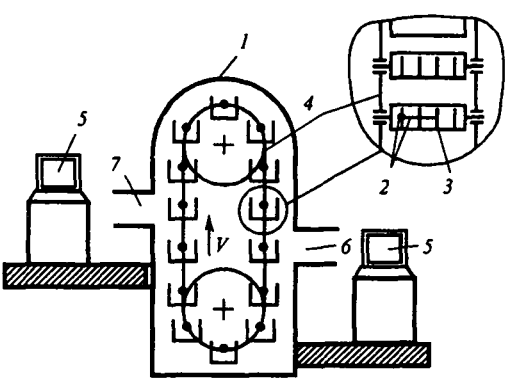


Рис. 10.2. Программируемый магазин-накопитель элеваторного типа

узлов, то склад-накопитель, имеющий до 1000 ячеек, комплектуется по программе различными элементами, необходимыми для выпуска этих печатных узлов. Каждая ячейка имеет свой номер (код) и в нее загружается определенный элемент в необходимом для выпуска печатных узлов (модулей) количестве.

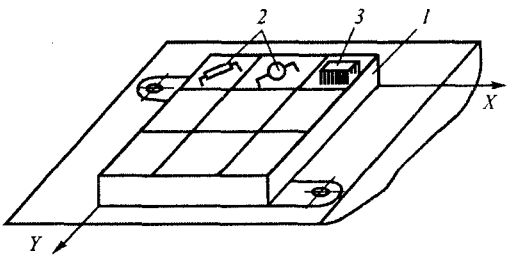


Рис. 10.3. Тара матричного типа

При поступлении на сборку конкретного печатного узла на устройстве управления набирается код платы, которая в данный момент будет монтироваться и для которой по программе будет проведена комплектация необходимых элементов. Накопитель имеет окно *6* для загрузки элементов и окно *7* для выгрузки при комплектации. Окна при необходимости располагают на разных уровнях (этажах) предприятия. Иногда для загрузки и выгрузки элементов используют одно окно.

При выгрузке полка останавливается перед окном *7* и над ячейкой (ячейками), из которой следует забрать элемент (элементы), загорается сигнальная лампа. Конвейер, последовательно перемещаясь и останавливаясь по программе, дает возможность упорядоченно подобрать комплект элементов на собираемую плату. Размещение и оформление комплекта в зависимости от типа производства осуществляется по-разному.

Комплект элементов *3*, размещаемых в ячейках *2* тары матричного типа *1*, представлен на рис. 10.3. Такая тара обеспечивает удобство нахождения конкретного элемента при установке его на плату как рабочим-монтажником, так и манипулятором при автоматизированной сборке. Для манипулятора тару устанавливают на программируемый стол, который перемещает ее по двум координатам и подводит под захват манипулятора определенную ячейку с элементом. При этом элементы должны быть определенным образом сориентированы в ячейке тары.

Комплект элементов можно размещать в устройстве, напоминающем магазин-накопитель, но меньшего объема. Такой накопитель предназначен для автоматизированных сборочных монтажных устройств и программно с ними совместим.

Для рабочих мест монтажников применяют различные варианты комплектовщиков (рис. 10.4): в виде различных конвейеров *1* с ячейками *2* для размещения элементов (рис. 10.4, *а*) или многоярусных устройств карусельного типа *3* (рис.10.4, *б*).

Для сборочных автоматов комплектация элементов осуществляется установкой их в ленту или в кассеты с определенным шагом. На рис. 10.5

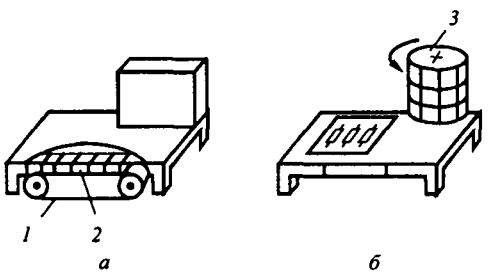


Рис. 10.4. Комплектовщики для столов монтажника:

а — конвейерного типа; *б* — карусельного типа

приведены несколько вариантов такого размещения элементов.

В таком упорядоченном виде элементы в лентах наматываются на бобины и хранятся в таком виде или поставляются заказчику. Возможен вариант размещения элементов в ленты в порядке их установки на ПП. В этом случае при монтаже потребуется одна лента. В противном случае необходимо иметь столько лент (кассет), сколько типоразмеров элементов будет установлено на ПП. Размещение МС и ЭРЭ в ленты и кассеты упрощает хранение, транспортировку и заправку их в сборочные и заготовительные устройства.

Для штучных ЭРЭ применяют загрузочные вибробункеры, обеспечивающие упорядоченную подачу элементов к сборочным автоматам или к устройствам предварительной подготовки их к монтажу. В чашу вибробункера ЭРЭ засыпают в произвольном виде. В результате виброкрутильных колебаний чаши с определенной частотой и амплитудой ЭРЭ

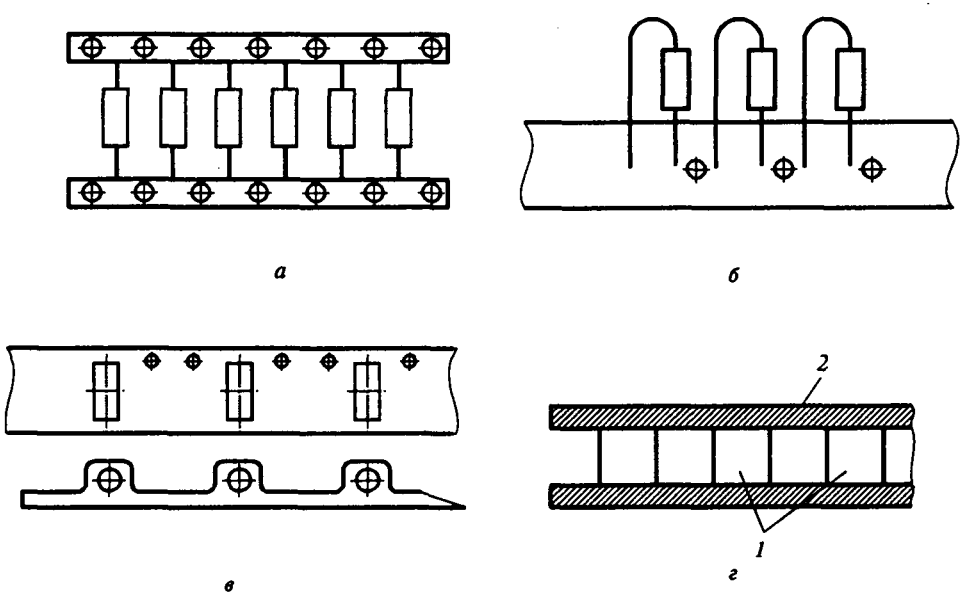


Рис. 10.5. Размещение ЭРЭ:

а, б — с осевыми выводами в ленте; *в* — элементы для поверхностного монтажа в ленте; *г* — корпусные *1* в кассете *2*

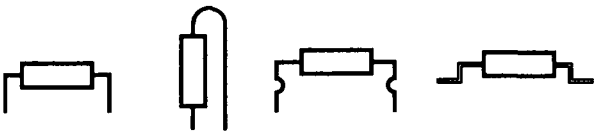


Рис. 10.6. Примеры формовки выводов элементов перед монтажом

движутся по винтовой дорожке в упорядоченном виде и поступают в подающий лоток механизма формовки и обрезки выводов или размещаются в ленту, кассету. Вибробункеры широко используют для ориентированной поштучной подачи дискретных элементов в станки-автоматы и автоматические линии.

Подготовка элементов к монтажу

Подготовка элементов к монтажу включает рихтовку, формовку, обрезку и лужение выводов. Рихтовка — исправление (выравнивание) формы выводов применяется, в основном, для осевых выводов. Формовка — придание определенной формы выводам (рис. 10.6). Обрезка — удаление излишков выводов. Лужение выполняется в случае, если выводы микросхем или ЭРЭ не облужены при поставке.

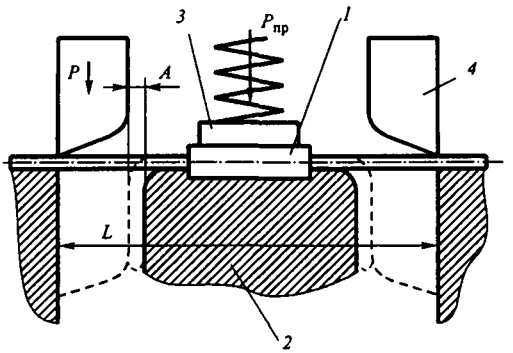


Рис. 10.7. Схема обрезки и П-образной формовки осевых выводов в штампе

Операции подготовки элементов к монтажу выполняют на отдельных или совмещенных приспособлениях. На рис. 10.7 приведена рабочая часть штампа обрезки и формовки осевых выводов элементов. Элемент *1* устанавливается на матрицу *2* и придавливается к ней прижимом *3*. При движении пуансонов *4* происходит вначале обрезка выводов в размер *L*, а затем — формовка по матрице. Зазор *A* равен диаметру вывода.

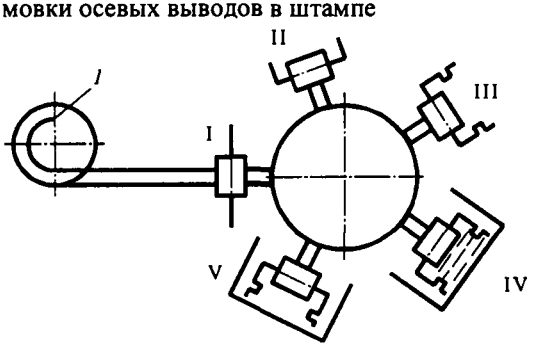


Рис. 10.8. Схема автомата для подготовки элементов к монтажу

На рис. 10.8 приведена схема автомата для подготовки

элементов к монтажу. Элементы загружаются в вибробункер *1* (или в кассету) и поштучно поступают к многопозиционной установке роторного типа. В позиции I происходит загрузка элемента, далее после поворота на позиции II выводы формуются и обрезаются, на позиции III выполняется зигформовка, на IV — выводы облуживаются и на V — элемент поступает в тару для дальнейшего использования.

Установка элементов на печатную плату и их фиксация

В опытном производстве и при ремонте ЭВМ установка элементов и пайка, как правило, выполняются на одном рабочем месте. При серийном производстве установка или, как говорят на производстве, «набивка» элементов выполняется отдельно перед групповой пайкой.

При неплотном монтаже и небольшой партии печатных узлов установку ЭРЭ можно осуществлять вручную по монтажному чертежу. В других случаях используют средства автоматизации и механизации. Примером такого полуавтоматизированного метода установки элементов может служить светомонтажный стол, схема которого приведена на рис. 10.9. Печатная плата *1* устанавливается на монтажный стол *2*, на котором размещается комплект ЭРЭ в ячейках тары *3*. Место установки ЭРЭ на плате обозначается лучом света *4*. Курсор *5* перемещается по плате в соответствии с программой от устройства управления *6* механизмом подсветки *7* и, останавливаясь, указывает место установки элемента. При этом загорается лампочка подсветки ячейки, из которой следует взять и установить элемент на плату.

На рис. 10.10 приведена схема автоматической установки для монтажа на плате элементов с осевыми выводами, размещенных в ленте. Плата *1* устанавливается на монтажном столе *2* в определенном положении, чтобы фиксировать нулевую отметку для собираемых плат. С бобины *3* лента *4* с элементами *5* по направляющим поступает в рабочую зону, где располагается рабочая головка *6*. В рабочей головке имеется механизм вырезания *7* ЭРЭ из ленты *4* в размер *L* и механизм удержания *8* ЭРЭ от выпадения после резки, который после формовки выводов в размер *l* подает и устанавливает элемент на плату. Формовка выводов осуществляется при движении пуансона *9* вниз относительно опорной матрицы *8*. Выво-

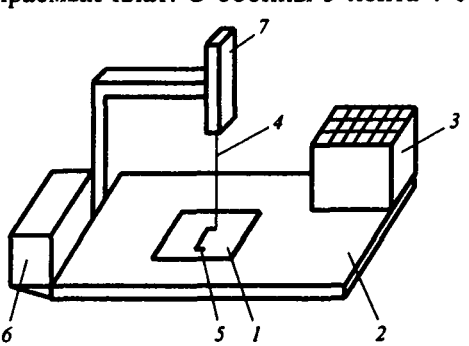


Рис. 10.9. Схема светомонтажного стола

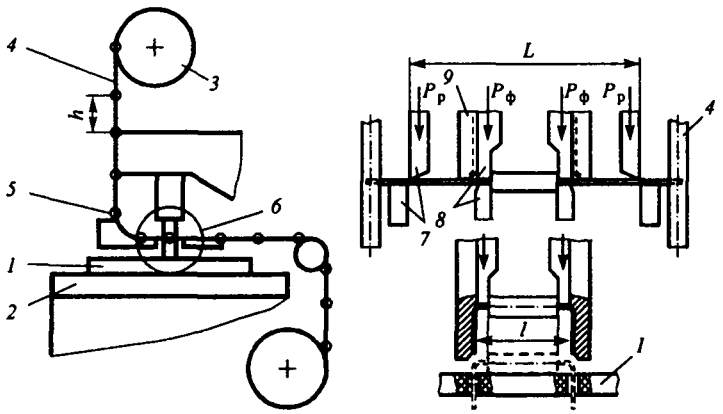


Рис. 10.10. Схема установки для автоматизированного монтажа элементов с осевыми выводами

ды удерживаются в радиусных канавках пуансонов. Эта канавка является направляющей при подаче элемента на плату, строго ориентируя выводы относительно монтажных отверстий. Плата перемещается по программе, устанавливая следующие отверстия под выводы ЭРЭ. Производительность таких автоматов (полуавтоматов) до 2000 элементов в час.

Автоматическая установка МС и ЭРЭ из кассет на плату с большой производительностью осуществляется на станке-автомате фирмы «Amistar» (рис. 10.11). Кассеты *1* установлены на наклонном подающем устройстве *2*, по которому выпавший из кассеты элемент *3* (МС или ЭРЭ) под собственным весом поступает на рабочую позицию *4*, где он ориентируется, захватывается установочной головкой *5* и подается на подведенное по программе место на ПП *6*. Автомат работает по программе от управляющего компьютера *7*.

Для монтажа ПП широко используют автоматические поточные линии, состоящие из нескольких установочных головок с элементами в бобинах. По мере продвижения ПП от одной головки к другой на нее последовательно устанавливают все ЭРЭ.

Автоматы для монтажа печатных узлов имеют различную компоновку, но у всех предусмотрены магазин-накопитель для размещения ПП, магазины-накопители устанавливаемых (набиваемых) на плату элементов, система программного управления процессом монтажа. На рис. 10.12 приведен общий вид станка-автомата

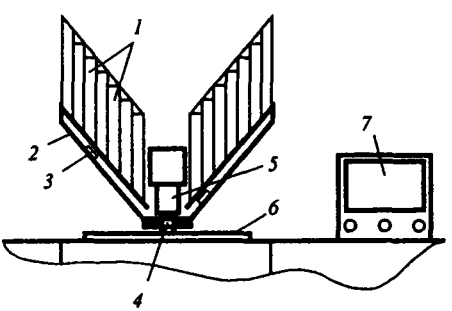


Рис. 10.11. Схема станка-автомата «Amistar» для монтажа микросхем и ЭРЭ на печатную плату из кассет

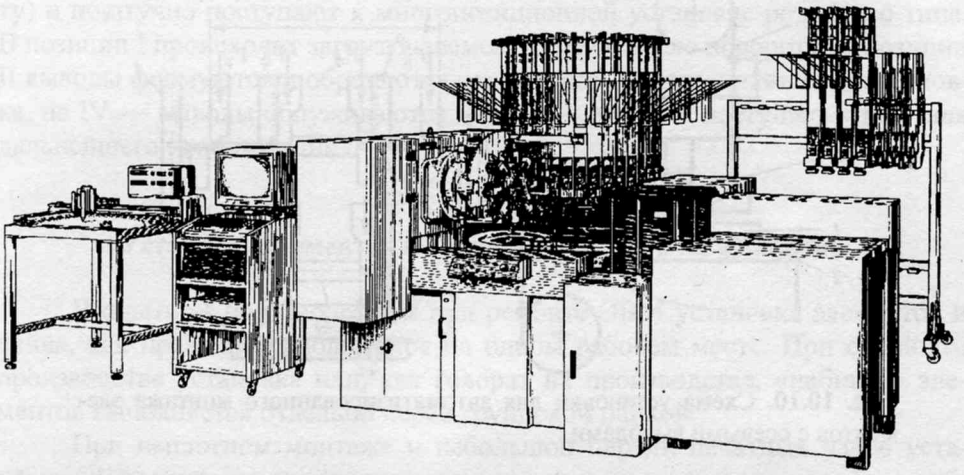


Рис. 10.12. Общий вид станка-автомата фирмы Fuji для установки на плату элементов с осевыми выводами

фирмы Fuji (Япония) для установки на ПП элементов с осевыми (штыревыми) выводами. Такой автомат имеет поворотную планшайбу, с восемью рабочими головками, которые поочередно осуществляют захват подготовленного элемента и устанавливают его на печатной плате в определенном по программе месте. Печатные платы размещаются в магазине-накопителе горизонтально по 25 штук, откуда они подаются на рабочий стол автомата и базируются на два штифта и опорные поверхности. Рабочий стол по программе перемещается по двум координатам и имеет угловой поворот. Бобины и пеналы-кассеты с лентами элементов устанавливают в сменные накопители. Каждый накопитель предназначен под определенный типоразмер элемента и определенный вид формовки. Ленту заправляют в подающее и формующее устройство в накопителе, накопитель устанавливают на поворотную карусель. Количество накопителей определяется количеством типоразмеров элементов, устанавливаемых на плату. При работе автомата обеспечивается определенная последовательность в поиске необходимого элемента (накопителя), шаговая подача ленты, извлечение элемента из ленты, формовка его выводов и передача элемента на перегрузочный механизм, откуда он будет захвачен рабочей головкой и установлен на плату. При повороте карусели происходит подготовка следующего элемента, к которому подойдет следующая рабочая головка. Вся работа станка-автомата обеспечивается устройством управления.

Чтобы установленные на плату МС и ЭРЭ не выпали или не сдвинулись со своих мест при последующей транспортировке, необходимо их фик-

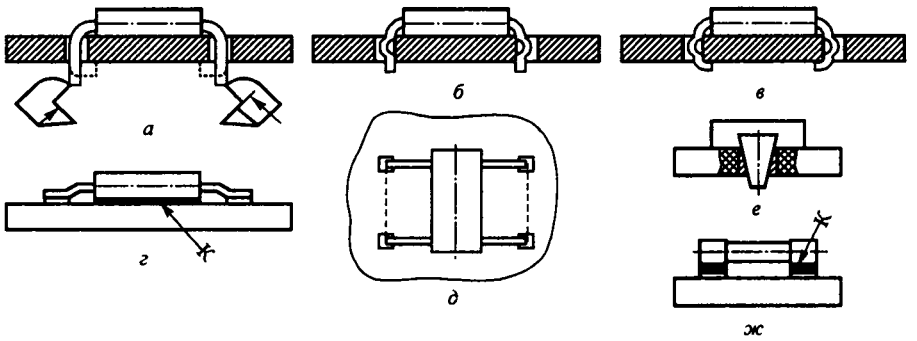


Рис. 10.13. Способы фиксации элементов на печатной плате:

а — подгибкой; *б* — зиг-формовкой; *в* — зиг-формовкой с замком; *г* — приклеиванием; *д* — припайкой диагональных выводов; *е* — коническим выводом; *ж* — паяльной пастой

сировать на поверхности ПП. На рис. 10.13 приведены несколько способов фиксации. Надежным, но трудоемким способом фиксации осевых выводов является их подгибка с обратной стороны платы (рис. 10.13, *а*). Удобной для станков-автоматов является фиксация элементов за счет упругих свойств выводов, имеющих зиг-формовку (рис. 10.13, *б*) или зиг-формовку с замком (рис. 10.13, *в*). Микросхемы с планарными выводами фиксируют на плате приклеиванием или припайкой диагональных контактов. В случае применения МС со штыревыми выводами конической формы выводы при установке заклиниваются в монтажных отверстиях и надежно удерживаются перед пайкой.

Элементы для поверхностного монтажа фиксируют путем приклейки на предварительно нанесенную паяльную пасту, на которой они устанавливаются и удерживаются.

Пайка элементов на печатной плате

В зависимости от типа производства и объема выпуска ЭА пайка элементов осуществляется вручную паяльником, групповыми и автоматизированными способами.

Ручную пайку выполняют паяльником на монтажном столе, снабженным системой локального удаления газов. Для паяльников должны выполняться следующие требования: терморегулирование, дозированная подача припоя в зону пайки нажатием кнопки (рычага), отсос газов из зоны пайки. Монтажник должен иметь браслет на руке для снятия электростатического поля. Паяльник используют в опытном, ремонтном производствах, при исправлении брака и при установке небольшого числа элементов, которые невозможно припаять другими способами.

При пайке как ручной, так и автоматической применяют припои и флюсы. Критерием их выбора является максимально допустимая температура пайки. В табл. 10.1 представлены некоторые марки припоев, применяемые в производстве ЭА.

Таблица 10.1. **Применяемые в производстве ЭА припои**

Марка припоя	Химический состав, %								Температура, °С	
	Sn	Pb	Cd	Bi	In	Ag	An	Sb	плавления	пайки
ПОС-61	59—61	39—40	—	0,1	—	—	—	0,8	183	До 240
ПОС-61+3 % Ag	57—59	36—38	—	—	—	3	—	0,1	190	До 280
ПОС-61+3 % An	57—59	36—38	—	—	—	—	3	0,1	190	До 280
ПОСК-50	50	32	18	—	—		—	—	145	180
ПОСИС-1	30	19	—	—	50	1,0	—	—	130	170
ПОСК-47	47	36	17	—	—	—	—	—	142	180
ПОС-40	40	60	—	0,1	—	—	—	2,0	235	250
ПСр-2,5	5,5	92	—	—	—	2,5	—	—	305	До 350
ПСр-2	30	63	5	—	—	2,0	—	—	235	До 260
ПОСВ-33	33	34	—	33	—	—	—	—	130	170

Для серийного производства рекомендуется использовать более производительные способы пайки, когда все соединения подвергаются пайке одновременно. Примером такого способа является *пайка погружением* (рис. 10.14). Плата *1* с установленными элементами размещается в приспособлении *2*. Места, не подлежащие пайке, закрываются термостойкой эпоксидной маской *3*, наносимой через трафарет или приклеиванием отштампованных пленочных масок. На места пайки наносится спирто-канифолевый флюс. Перед погружением платы в ванну с расплавленным припоем с его поверхности следует удалить оксидную (шлаковую) пленку. Существуют механические, химические способы удаления пленки и очистки поверхности. Цикл пайки следующий: плату опускают на поверхность припоя, где происходит прогрев мест пайки — в течение 2...4 с, затем на приспособление накладываются колебания от вибратора *4* в течение 3...5 с. За счет этого улучшается растекаемость припоя и он проникает в зазор между выводом и монтажным отверстием. Происходит оплавление припоем мест пайки. Частота коле-

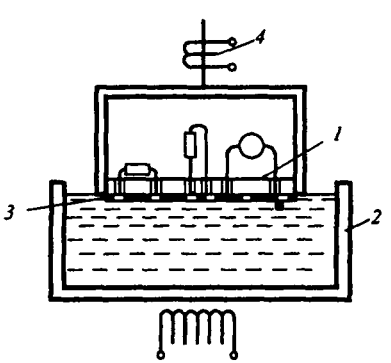


Рис. 10.14. Пайка погружением

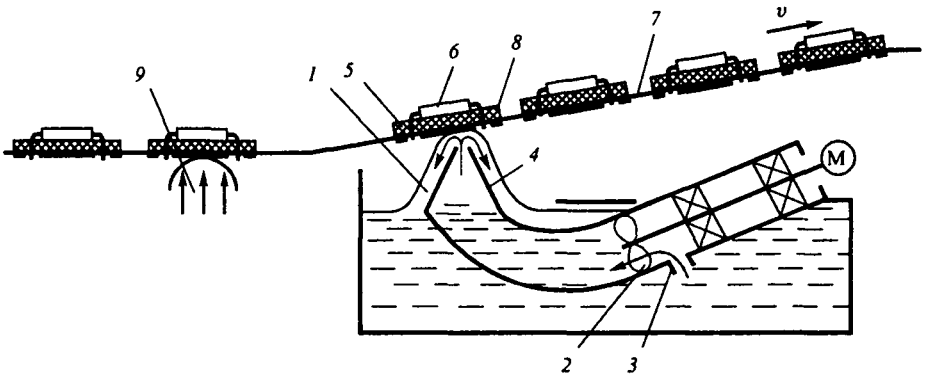


Рис. 10.15. Пайка волной припоя

баний составляет около 100 Гц, амплитуда — 0,1...0,3 мм. Приспособление с платой поднимают из ванны и припой затвердевает.

Пайка погружением является производительным способом, так как при этом в приспособление можно устанавливать по несколько плат. Недостатком этого способа является сложность качественного удаления пленки с поверхности припоя, что приводит к некачественному пропаю. Кроме того, возможен и термоудар, несмотря на защитную маску. Существуют другие варианты пайки погружением, в которых устраняют присущие пайке погружением недостатки: применение керамической маски, пайка в нейтральной среде и т. д.

Широкое распространение нашел групповой способ пайки, называемый *пайка волной припоя*. На рис. 10.15 приведена схема пайки обычной волной припоя, образуемой электромагнитным, механическим или гидродинамическим способами. В приведенной на рис. 10.15 установке волна припоя *1* образуется вращением крыльчатки *2*, которая нагнетает расплавленный припой через отверстие *3* из глубины ванны и гонит его под давлением через сопло патрубка *4*, образуя волну. Печатные платы *5* с установленными на них элементами *6* проходят последовательно над волной припоя, при этом обеспечивается пайка выводов к контактным площадкам. Скорость перемещения платы должна быть такой, чтобы от соприкосновения соединения с волной и выхода из нее обеспечивалась качественная пайка; припой хорошо растекался в зазор между выводом и монтажным отверстием и не образовывались наплывы и сосульки на поверхности пайки. Платы устанавливают и крепят в специальные рамки, которые перемещаются транспортером *7*. Места, не подлежащие пайке, закрываются защитной маской *8*.

Движение плат под углом устраняет выброс припоя на обратную сторону через зазоры в монтажных отверстиях и уменьшает вероятность образования припойных сосулек. Перед пайкой поверхность плат обрабатывают пеной спирто-канифольного флюса *9*. После пайки остатки флюса удаляют

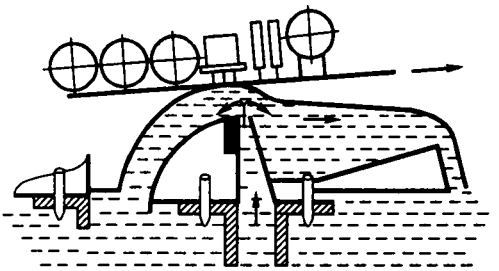


Рис. 10.16. Схема пайки λ-волной припоя

органическим растворителем и вращающимися щетками. После очистки проводят сушку плат. Чтобы устранить окисление припоя и поверхности пайки, пайку проводят в нейтральной среде (аргон, азот).

Рабочая часть патрубка *4* выполняется сменной, в виде различных сопловых насадок, обеспечивающих различную форму волны и скорость истечения припоя. На рис. 10.16 показана насадка, обеспечивающая так называемую λ-волну припоя, с помощью которой получают бездефектную пайку плат с повышенной плотностью монтажа без образования сосулек, мостиков и натеков припоя. Такая волна припоя обеспечивает оптимальные условия входа и выхода контакта. Предварительно подогретый печатный узел входит в волну в точке, где скорость потока припоя максимальна, что обеспечивает быстрый прогрев мест пайки. Активная (средняя) часть волны имеет движение как навстречу узлу, так и по ходу его перемещения, обеспечивая хорошую смачиваемость припоем места пайки. На выходе скорость потока почти равна скорости печатного узла, что устраняет вытягивание припоя из потока и образование сосулек.

Пайку печатных узлов с элементами для поверхностного монтажа (рис. 10.17) осуществляют с использованием припойных (паяльных) паст. Паста продавливается ракелем через трафарет на контактные площадки платы.

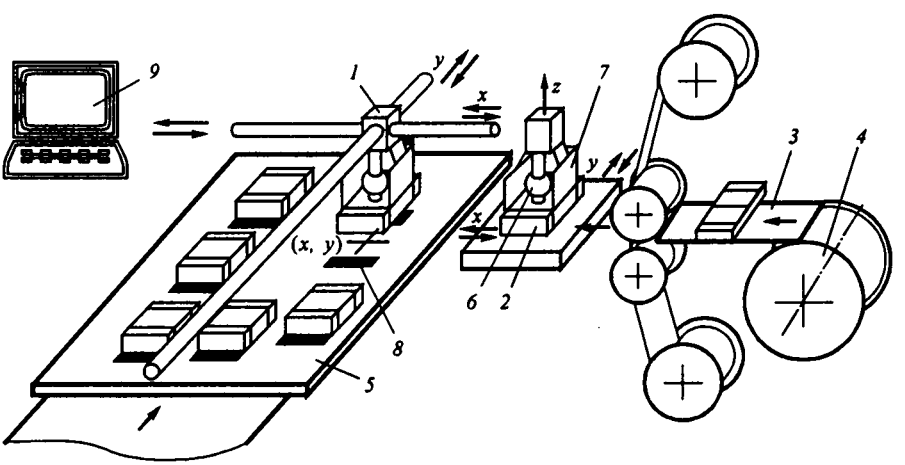


Рис. 10.17. Схема станка-автомата для поверхностного монтажа элементов на плату

Элементы по программе устанавливаются на пасту, которая их фиксирует и удерживает от смещения.

В приведенной на рис. 10.17 схеме станка-автомата установка элементов поверхностного монтажа осуществляет рабочая головка *1*. Она захватывает элемент *2*, освобожденный из ленты *3*, которая сматывается с бобины *4*. Бобины (или кассеты) с элементами устанавливаются с обеих сторон платы *5*. Рабочая головка захватывает элемент пневмозахватом *6* строго ориентированно пинцетными захватами *7*. Головка по программе перемещается по трем координатам и устанавливает элемент на пасту *8* в нужном месте. Управление осуществляется от ПЭВМ *9*.

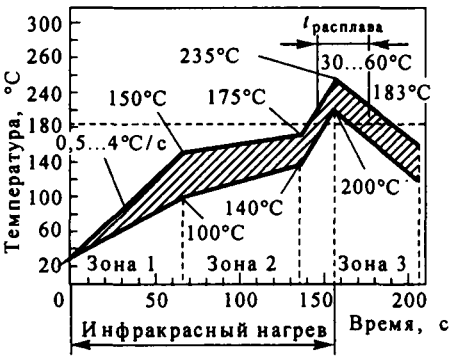


Рис. 10.18. Диаграмма работы инфракрасной печи

После установки всех элементов (для этого может потребоваться несколько автоматов) плата конвейером перемещается на последнюю позицию, где происходит пайка в инфракрасной (ИК) печи в нейтральной среде. Температурный режим работы такой печи приведен на диаграмме, изображенной на рис. 10.18.

Элементы, которые нельзя установить на автоматах, устанавливают вручную с использованием светомонтажных столов с последующей пайкой волной припоя. По завершении монтажных работ печатный узел проходит тестовую проверку на функционирование.

10.3. Технология монтажа объемных узлов

К объемным узлам относятся блоки (модули 2-, 3-го и т. д. уровней), стойки, шкафы, т. е. те элементы конструктивной иерархии, которые строятся на базе модулей первого уровня. Для внутриблочного или объемного монтажа используют жгуты, ленточные провода (ленточные кабели) и кабели (обычные круглые).

Технология жгутового монтажа

Жгуты чаще всего используют для внутриблочного монтажа. Технология изготовления жгутов включает резку монтажных проводов, раскладку их на шаблоне, вязку жгутов, маркировку и прозвонку. Резка проводов в размер и

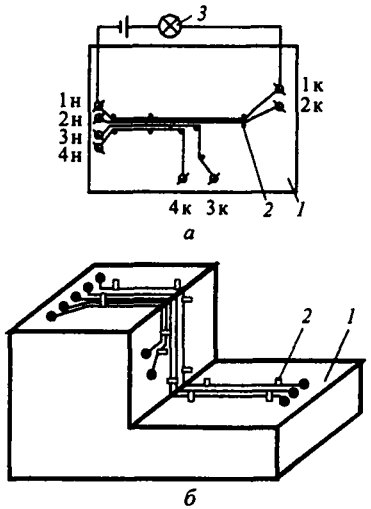


Рис. 10.19. Плоский (*а*) и трехмерный (*б*) шаблоны для раскладки жгутов

раскладка проводятся на автоматических установках. При этом иногда снимается с концов проводов изоляция и проводится первоначальная маркировка проводов. Для удобства их раскладки применяют провода в изоляции разного цвета.

Если раскладку проводов проводят вручную, то выполняют это на плоских (рис. 10.19, *а*) или объемных (трехмерных) (рис. 10.19, *б*) шаблонах (планшетах). Шаблоны *1* изготовляют из фанеры, пластика, алюминия. Необходимая конфигурация жгута, определяемая расположением подключаемых печатных узлов, субблоков, очерчивается посредством штифтов *2*, обеспечивая трассу расположения проводов. Эта трасса может быть и прочерчена. Провода, имеющие маркировку, укладывают по трассе с закреплением начала (н) и конца (к) провода в клеммах. На рис. 10.19 показано несколько проводов, в реальности их может быть десятки и более. В этом случае правильно установленный провод замыкает контрольную электросеть и загорается на время лампочка подсветки (*3*).

Для закрепления уложенных проводов в жгуты применяют вязку хлопчатобумажными нитями с помощью пистолетов для вязки, липкую ленту, склеивание, либо провода размещают в трубке из полиэтилена. Изготовленный жгут проверяют и монтируют внутри блока, коммутируя печатные узлы, субблоки между собой.

Для защиты жгута от воздействий электрического и электромагнитного поля его помещают в экран. Заземление экрана жгута выполняется по правилам заземления коаксиального кабеля. Незадействованные провода жгута должны заземляться, причем половина их заземляется на одном конце жгута, а вторая половина — на другом. Эти свободные заземленные провода в жгуте будут выполнять функцию электрического экрана.

При установке в аппаратуру жгуты закрепляют. В качестве элементов крепления используют скобы, хомутики в стационарной аппаратуре (см. рис. 10.20) и

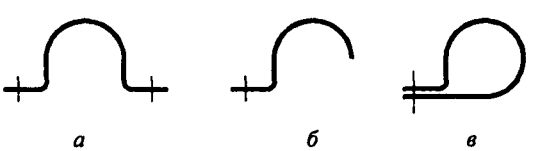


Рис. 10.20. Элементы фиксации жгута:
а — скоба двусторонняя; *б* — скоба односторонняя; *в* — хомутик

ленты, мастики, нити в бортовой аппаратуре. В качестве материала для скоб и хомутиков лучше использовать пластмассы, так как металлические двусторонние скобы и хомутики образуют по длине жгута замкнутые витки и могут исказить и ослабить передаваемые сигналы. Шаг крепления зависит от диаметра жгута и выбранного элемента крепления. Изгиб и ответвление жгута необходимо дополнительно фиксировать в местах поворота.

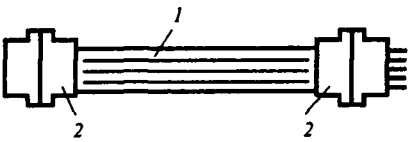


Рис. 10.21. Соединительное устройство для монтажа ЭА:

1 — ленточный провод; *2* — соединители

Технология монтажа с использованием ленточных проводов

Ленточные провода (используют также термины «ленточный кабель», «плоский кабель») применяют для внутриблочного, межблочного и межстоечного монтажа ЭА как самостоятельно, так и в комплекте с соединителями, образуя соединительное устройство (рис. 10.21). В современной ЭА ленточные провода занимают до 80 % коммутационной сети. По сравнению с обычными кабелями ленточные провода обладают следующими достоинствами: хороший теплоотвод, возможность автоматизации монтажа, уменьшение массы и объема кабельной сети, повышение надежности работы аппаратуры. Ленточные провода делятся на три вида: опрессованные, тканые и печатные.

Опрессованные провода изготавливают путем экструзии, склеивания и сварки изоляции на проводящие жилы. В табл. 10.2 представлены основные электроизоляционные материалы, применяемые для изготовления ленточных проводов.

Таблица 10.2. **Электроизоляционные материалы для ленточных проводов**

Материал электроизоляции	Диапазон рабочих температур, °С
Полиэтилен высокого давления	–60...+70
Полиэтилен облученный	–60...+100
Пластикат поливинилхлоридный	–60...+70
Фторопласт	–60...+200
Пленка двухслойная полиэтилентерефталат-полиэтиленовая клеевого соединения	–60...+70
Пленка полиэтиленфталатная электроизоляционная марки ПЭТФ	–60...+120
Пленка полиимидная	–60...+200

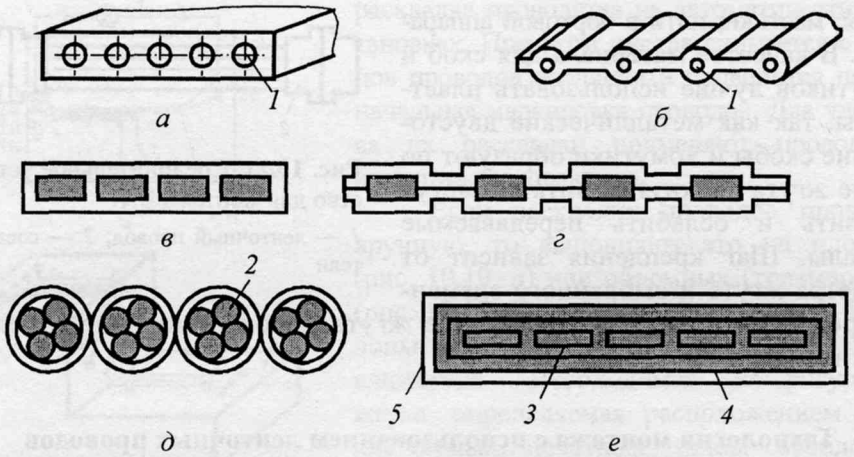


Рис. 10.22. Сечения опрессованных ленточных проводов:

а — с круглыми жилами *1*; *б* — фасонное с круглыми жилами; *в* — с прямоугольными (плоскими) жилами; *г* — с прямоугольными жилами клеевого соединения изоляции; *д* — с многопроводными круглыми жилами *2*; *е* — с прямоугольными жилами *3*, с общим экраном *4* и защитной оболочкой *5*

На рис. 10.22 приведены различные варианты сечений опрессованных ленточных проводов. Для облегчения монтажа один край провода выполняется кодовым — измененным цветом или добавлением конструктивного выступа. Токопроводящие жилы в ленточном проводе бывают однопроволочными и многопроволочными (скрученными или плетеными), круглого или прямоугольного сечений и располагаются параллельно в один ряд. Основным материалом для изготовления токопроводящих жил является медь. Для защиты от окисления жилы покрывают олово-свинцом, серебром, никелем, золотом.

Для подвижных блоков ЭА применяют гибкие ленточные провода, жилы которых изготовляют многопроводными из меди или бронзы.

Экранирование ленточных проводов осуществляется металлизацией внешних поверхностей, нанесением на внешнюю поверхность проводящих пластмасс, обмоткой спиральными экранами. Если экран в конструкции провода отсутствует, то его функции могут выполнять отдельные жилы провода. Для этого жилу, проложенную по соседству с сигнальными в местах подсоединения провода к коммутационному узлу, заземляют.

Промышленностью поставляется широкий ассортимент ленточных проводов различного назначения. Низкочастотные провода предназначены для работы на частоте переменного тока до 20 кГц при максимальной температуре +200 °С. Высокочастотные провода обеспечивают работу на часто-

тах переменного тока до 100 МГц при температуре от –50° до +50 °С, их волновое сопротивление составляет 50 , 75, 100, 120, 150 Ом.

Тканые ленточные провода представляют собой набор монтажных проводов (экранированных и неэкранированных), скрепленных нитями из капрона, фенилона, хлопчато-бумажных методами ткачества или плетения. Так как технологии ткачества и плетения достаточно хорошо отработаны, то тканые провода относительно дешевы и технологичны в применении. Шаг расположения проводников в тканом проводе можно регулировать в зависимости от необходимости.

Особую группу представляют *печатные провода* (шлейфы), позволяющие максимально уменьшить габаритные размеры и массу ЭА. Их выполняют по технологии ПП на гибкой диэлектрической основе: лавсане, полиимиде, полиэтилене.

Подготовка ленточных проводов к монтажу состоит из следующих операций: визуальная проверка провода на отсутствие внешних дефектов и повреждений, нарезка на отрезки необходимой длины, разделка концов провода и их формовка, монтаж с соединителями. В единичном и мелкосерийном производствах нарезку ленточных проводов на отрезки (мерную резку) осуществляют, как правило, вручную, в серийном и массовом производствах — автоматизированно. Для снятия изоляции с жил ленточного провода используют методы, перечисленные в табл. 10.3. Они должны обеспечивать качественную поверхность жил без остатков изоляции.

Таблица 10.3. **Методы снятия изоляции с ленточных кабелей**

Метод удаления изоляции	Вид изоляции						
	Полиэтилен	Поливинил-хлорид	Полиэтилен облученный	Фторопласт	Пленки ПЭТФ-ПЭ и ПНЛ	Пленка ПЭТФ	Пленка ПМФ
Механический	+	+	+	+	+	+	+
Термомеханический	+	+	–	–	+	+	–
Термический	+	+	–	+	+	+	+
Химический	–	+	–	–	+	+	–
Термохимический	+	+	–	–	+	+	–
Лазерный	–	–	–	–	–	–	+

Примечание. «+» — рекомендуется, «–» — не рекомендуется.

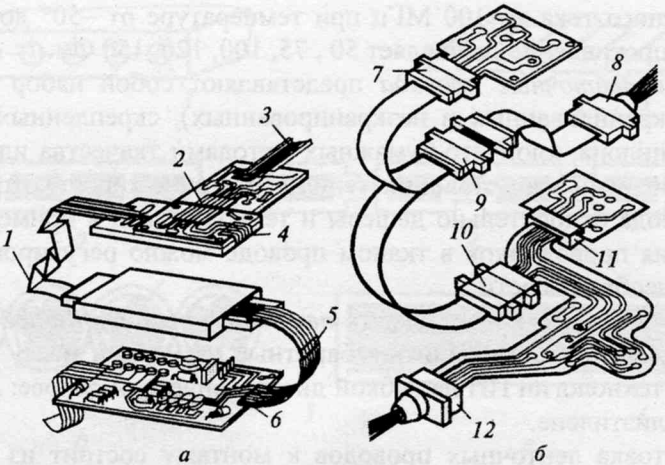


Рис. 10.23. Неразъемные (*а*) и разъемные (*б*) соединения ленточных проводов:
1 — между блоками; *2* — между платами; *3* — платы с внешним устройством; *4* — одной стороны платы с другой; *5* — межпроводное соединение; *6* — соединение с печатной платой; *7* — соединитель на плате; *8* — соединение ленточного провода и круглого кабеля; *9* — соединение нескольких соединительных устройств; *10* — соединение ленточного и печатного проводов; *11* — соединение печатная плата–кабель; *12* — соединение круглого кабеля и печатного провода

Наиболее распространен механический способ снятия изоляции специальными резцами, радиальным строганием, абразивными кругами. После снятия изоляции проводят лужение зачищенных от изоляции участков жил погружением в ванну с флюсом и припоем. После лужения концы проводников ленточных проводов формуют на специальных приспособлениях или установках. Вид формования диктуется типом соединителя, с которым будет монтироваться ленточный провод.

Соединительные устройства, образуемые одним или несколькими ленточными проводами и соединителями различных типов, могут быть выполнены в двух видах: разъемными и неразъемными (рис. 10.23). Разъемное соединение ленточных проводов осуществляется соединителями (разъемами).

При монтаже ленточных проводов используют следующие технологические операции:

- пайка — отдельные жилы провода могут быть впаяны непосредственно в монтажные отверстия печатной платы, спаяны друг с другом для соединения отдельных ленточных проводов, припаяны к контактам соединителя;
- сварка — отдельные жилы могут быть приварены к контактам соединителя, сварены друг с другом;

• обжимка — провода могут быть вставлены в контакты соединителя и обжаты; при этом применяют обжимные втулки для соединения жил разных проводов;

• прокалывание и врезание — соединение жилы с контактом соединителя или с другой жилой может быть получено путем прокалывания или прорезания изоляции провода (отсутствует подготовка концов провода; в случае ленточного провода с плоскими жилами сами жилы можно использовать в качестве контактных штырей соединителя, вводимых в соответствующие гнезда, образуя прижимные контакты);

• накрутка — соединение жил провода с контактами соединителя или переходной колодки путем их механической навивки на контакты.

Пайка проводников ленточных проводов является одним из простых и широко используемых методов. Она требует минимальной оснастки и обеспечивает высокую производительность и низкую себестоимость. Кроме того, паяные соединения легко контролировать на качество контактирования. Для получения высоконадежных паяных соединений изоляция должна быть удалена и проводники облужены (или на жилах должен быть напрессован припой толщиной около 0,3 мм). Технологический процесс монтажа ленточного провода в соединитель зависит от марки провода и типа соединителя.

Перед монтажом выводы соединителя и жилы провода должны быть тщательно обезжирены. Монтаж ведется в приспособлениях, ориентирующих и фиксирующих жилы относительно контактов соединителей. Розетка (вилка) соединителя закрепляется в приспособлении. На токопроводящую жилу ленточного провода надевают изоляционную трубку. Место пайки флюсуется. Жила вставляется в гнездо контактов и припаивается. При пайке не допускается перекрещивание жил и провод не должен иметь сдвигов до затвердения припоя. После удаления остатков флюса на контакты соединителя (на места паек) надвигаются изоляционные трубки.

При сборке соединителя необходимо обеспечить надежную защиту мест пайки от механических деформаций и воздействия окружающей среды. Для этого применяют переходные патрубки, скобы, заливку компаундом. Основные места заделки жил провода при пайке в соединители приведены на рис. 10.24. Радиус гибки R ленточных проводов у

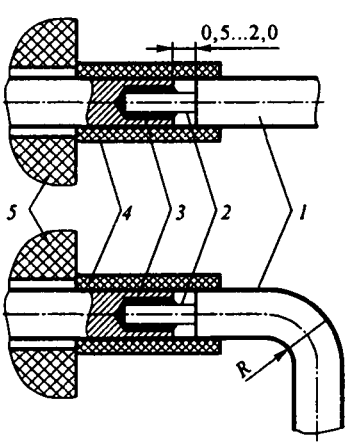


Рис. 10.24. Места заделки жил при пайке в соединители:
1 — ленточный провод; *2* — жила; *3* — контакты соединителя; *4* — изоляционные трубки; *5* — соединитель

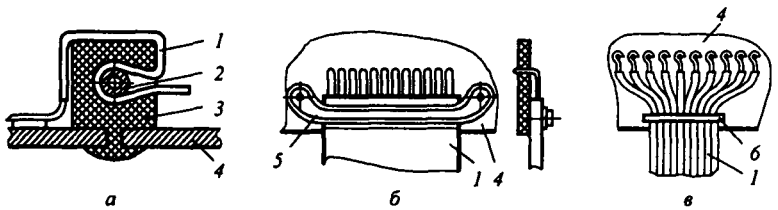


Рис. 10.25. Крепление ленточных проводов при пайке на печатные платы:

а — стержневое крепление; *б* — крепление скобой; *в* — изолированной проволокой; *1* — ленточный провод; *2* — стержень; *3* — держатель; *4* — печатная плата; *5* — скоба; *6* — изолированная проволока

мест пайки должен быть не менее двукратной толщины ленточного провода по наружной изоляции.

Пайку ленточных проводов на ПП проводят внахлест на контактные площадки ПП, в отверстия и на штыри с предварительным креплением ленточного провода (рис. 10.25). Для пайки ленточных проводов чаще всего применяют припой ПОС-61 и флюс ФКСп. После пайки остатки флюса необходимо удалить.

Надежные паяные соединения можно выполнить последовательно или параллельно специальным паяльником, имеющим определенную форму. Для получения надежных соединений важна чистота области соединения. С помощью приспособления выравнивают жилы провода и удерживают их в фиксированном положении во время пайки.

Для повышения производительности процесса монтажа провода применяется одновременная групповая пайка всех жил. Для этого жилы зажимают в фиксированном положении и оплавляют припоем.

Соединение жил проводят также с помощью паяльных муфт. Для этого применяют сборочные паяльные термоусадочные муфты типа «термофит», представляющие собой узел, надеваемый на место соединения (пайки) жил. Узел состоит из изоляционной термоусадочной оболочки, кольца из припоя с флюсом и уплотнительных герметизирующих колец. Изоляционную оболочку муфты изготавливают из радиационно-облученного синтетического, негорючего термоусадочного материала (полихлорид, фторопласт, политетрофторэтилен и др.). Процесс изготовления термоусадочной оболочки заключается в следующем. Пластиковую оболочку, в частности трубку, подвергают горячей формовке, придавая ей необходимую форму и размеры, затем ее интенсивно облучают гамма-излучением для получения поперечных структурных связей в молекулярных цепях пластмассы. В результате этого материал приобретает новые термоусадочные свойства, выдерживает бóльшие растяжения (увеличение по диаметру вдвое и более). Если такую оболочку быстро нагреть выше точки плавления, она получит

усадку до первоначального размера и примет заданную форму при горячей формовке.

Для монтажа проводов с высокотемпературной изоляцией используют паяльный сплав, имеющий температуру плавления 182 °С и содержащий 63 % олова и 37 % свинца. Для монтажа проводов с нетермоустойчивой изоляцией (поливинилхлорид, полиэтилен и т. п.) применяют сплав, имеющий температуру плавления 145 °С и содержащий 18 % кадмия, 51 % олова, 31 % свинца. Оба типа колец припоя должны содержать активирующий паяльный флюс. Уплотнительные герметизирующие кольца изготавливают из термопластичного плавкого материала.

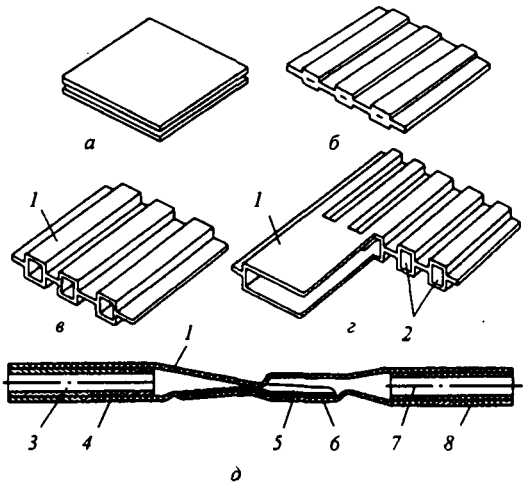


Рис. 10.26. Последовательность получения оболочки групповой термоусадочной паяльной муфты (*а—г*) и сечение паяльной муфты для соединения ленточный провод–круглый провод (*д*):

1 — групповая паяльная муфта; *2* — карманы для отдельных жил; *3* — полость для ленточного провода; *4* — герметизирующая прокладка; *5* — припой с флюсом; *6* — контактная полоса; *7* — полость для круглого проводника; *8* — герметизирующее кольцо

Для соединения ленточных проводов с прямоугольными жилами используют муфты прямоугольного сечения. Последовательность изготовления групповых муфт приведена на рис. 10.26. Два листа пленки (рис. 10.26, *а*) скрепляют между собой с заданным шагом жил ленточного провода (рис. 10.26, *б*). Затем проводят облучение муфты. Расширение карманов муфты для придания ей определенной формы с размерами карманов, обеспечивающими размещение соединяемых проводников, осуществляют в специальной форме сжатым воздухом. Если полученную оболочку нагреть, произойдет ее усадка и она примет плоскую форму.

В каждый карман муфт предварительно помещают облуженные соединительные контактные полосы. Форма контактной полосы *6* определяется формой жил провода: плоская — для прямоугольных проводников, в виде лотка — для круглых проводников (рис. 10.26, *в*). При пайке каждая жила соединяется с контактной полосой, которая повышает прочность паяного соединения. При нагреве происходит усадка муфты, припой и флюс растекаются в обе стороны, охватывая соединяемые проводники и контактные полосы.

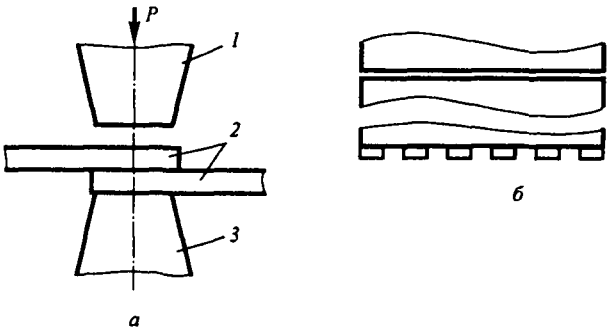


Рис. 10.27. Диффузионная сварка проводников:

а — схема сварки; *б* — формы сварочных электродов; *1*, *3* — сварочные головки; *2* — ленточные провода

Групповая паяльная муфта (рис. 10.26, *г*) имеет полость коробчатой формы, которая вмещает ленточный провод и служит после усадки для лучшей герметизации и разгрузки проводников (жил) от механических нагрузок. Такие полости могут располагаться с обоих концов групповой паяльной муфты. Оболочки групповой паяльной муфты для облегчения визуального контроля качества пайки изготавливают из прозрачной пленки.

Сварка жил ленточных проводов основана на механическом давлении и нагреве соединяемых контактов. Нагретые выступы размягчают и продавливают изоляцию, обеспечивая связь между жилами и контактами, закрепляемую последующей сваркой. Схема процесса диффузионной сварки приведена на рис. 10.27, *а*. Свариваемые концы ленточных проводов *2* помещают между подогретыми выступами сварочных головок. Нижняя головка *3* неподвижна. Верхняя подвижная головка *1*, опускаясь, создает определенное давление сварки. Изоляция оплавляется и вытекает из зоны сварки, а большое давление и температура обеспечивают диффузию материала жил друг в друга. Формы сварочных выступов показаны на рис. 10.27, *б*.

Прочное соединение жил проводов обеспечивают следующие технологические параметры: температурный режим составляет 50...60 % от температуры плавления материала жилы; давление — в два раза больше значения предела текучести соединяемых материалов; время выдержки — от 3 до 9 с.

Среди методов механического монтажа в цепях с ленточными проводами наибольшее распространение получили: обжатие, прокалывание, прорезка и накрутка.

Метод обжатия используют для соединения проводов с круглыми и прямоугольными жилами (рис. 10.28). После снятия изоляции прямоугольным жилам *1* придается трубчатая форма и в таком виде их вставляют в обжимные гильзы *2*, а круглые жилы *3* помещают в трубчатые окончания прямоугольных

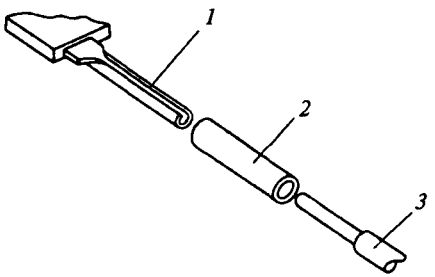


Рис. 10.28. Монтаж проводов методом обжатия жил

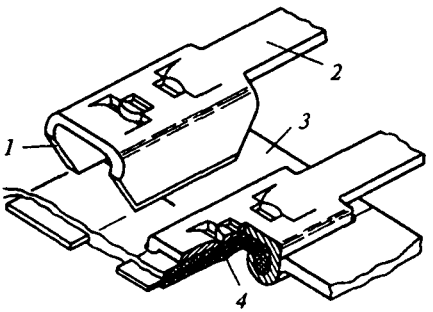


Рис. 10.29. Монтаж методом прокалывания изоляции проводов

жил, и весь ряд соединенных контактов обжимается с помощью приспособления, обеспечивающего одновременное обжатие всех гильз на жилах.

Для обжатия используют различные приспособления — механические, гидравлические, электромеханические.

Метод прокалывания изоляции штампованного контакта с жилами ленточного провода представлен на рис. 10.29. Провод *3* отрезают по длине и зажимают в приспособление. Штампованные ножки *1* контакта *2* продавливают через изоляцию и загибают под углом 180° для повторного продавливания изоляции с другой стороны. В то же время выступы *4* на верхней плоскости контакта прорезают изоляцию и соединяются с жилой. Выступы и ножки контакта прочно соединены с жилой в четырех точках. Кроме того, расстояние между ножками меньше ширины жилы, в результате чего образуется кромочное соединение жилы с контактом. Контакты могут быть установлены на конце провода и в любом месте по его длине.

На рис. 10.30, *а* представлено соединение ленточного провода с хвостовиками контактов *методом прорезки*. Ленточный провод *1* сгибается по поверхности клина *2*, на которую предварительно наложена амортизирующая прокладка. Концевая часть контактов соединителя выполнена в форме зуба *3*. При сборке ленточный провод устанавливают в соответствующий паз соединителя *4*, хвостовики прорезают изоляцию и входят в соединение с жилами провода.

Оформление концов ленточных проводов методом прорезки используют в соединителях типа «Вампир». Ножевые V-образные контакты соединителя получают штамповкой. Контакты имеют паз в виде ласточкина хвоста (рис. 10.30, *в*). Такие контакты используют с круглыми многопроволочными жилами и они должны быть ориентированы строго по шагу провода. При приложении усилия к контактам они прорезают изоляцию, при этом деформируется жила ленточного провода и обеспечивается необходимое

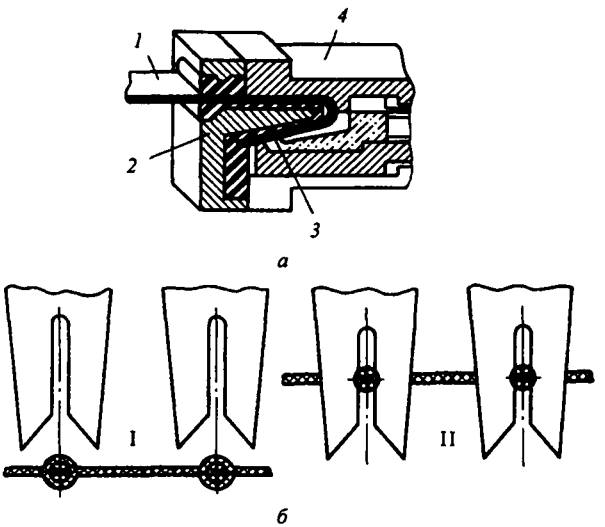


Рис. 10.30. Монтаж ленточных проводов методом прорезки изоляции:

а — стягиванием клина с корпусом соединителя; *б* — с помощью ножевых V-образных контактов; *I* — перед прорезкой; *II* — после прорезки

электрическое соединение. Монтаж всех жил проводится одновременно без предварительной зачистки провода от изоляции.

Метод накрутки — прогрессивный и высокопроизводительный метод монтажа, для которого созданы специальные соединители. Накрутка также используется для создания ответвлений от ленточного провода и присоединения его к требуемому участку электрической схемы через переходные колодки в виде матриц. Используют накрутку прежде всего для проводов с круглыми сечениями жил.

Накруткой называется электрическое непаяное газонепроницаемое соединение между проводником и штырем (контактом) с острыми краями, при котором проводник накручивается на штырь с определенным усилием, при этом витки проводника обеспечивают контакт и, врезаясь, закрепляются на углах штыря. Усилие обеспечивается за счет жесткости накручиваемого проводника.

Для получения газонепроницаемых площадок в соединении, обеспечивающих постоянство переходного сопротивления, необходимо строго контролировать натяжение жилы. Обычно накрутку проводят специальным инструментом с усилием, равным 70 % предела прочности материала жилы на разрыв. Для создания надежного газонепроницаемого соединения с площадью поверхности контакта, равной или большей площади сечения жилы диаметром 0,4...1,6 мм, необходимо накрутить 4—7 витков.

При монтаже накруткой необходимо, чтобы помимо витков из жилы без изоляции (рис. 10.31, *а*) был один-два витка провода с изоляцией *1* (рис. 10.31, *б*), хотя это возможно не для всех ленточных проводов. Изоляция уменьшает концентрацию напряжения в точке, где осуществляется первое врезание жилы в край контакта, и снижает вероятность обрыва провода от возможных вибраций и ударов.

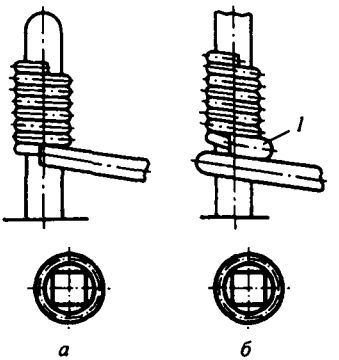


Рис. 10.31. Монтаж методом накрутки:

а — немодифицированным; *б* — модифицированным

Хорошо зарекомендовали себя контакты с квадратным и прямоугольным сечениями, в которых максимальное напряжение создается в углах. Монтажные контакты должны обладать достаточной прочностью на скручивание, чтобы выдержать вращающий момент, возникающий при накрутке. Рекомендуется их изготовлять из сплавов: бериллий-медь, медь-никель, латунь, плакированная сталь и др.

Для монтажа печатных проводов в основном используют пайку и термокомпрессорную сварку. Пайка облегчается, если проводники позолочены, так как в этом случае покрытие не требует обработки флюсом. При применении флюса после пайки необходимо тщательно промывать соединения. Подсоединение проводника печатного провода к соединителю осуществляют чаще всего пайкой к специальным штырям (контактам) (рис. 10.32, *а*). Закругление штыря предотвращает повреждение тонкой пластмассовой пленки при его установке.

Для установки штыря на однослойном печатном проводе *5* делается сквозное отверстие и штырь *4* проходит через отверстие, так что пленка

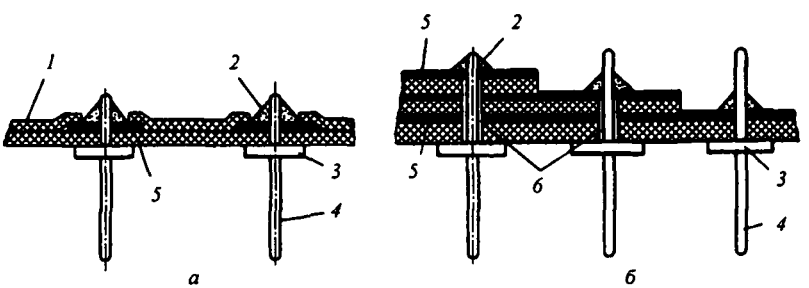


Рис. 10.32. Установка штырей на печатные однослойный (*а*) и многослойный (*б*) печатные провода:

1 — изоляционный слой; *2* — припой; *3* — буртик; *4* — штыри; *5* — печатный провод; *6* — отверстия в печатных проводах

ложится на буртик *3* штыря. В изоляционном слое *1* провода предусматривается отверстие меньше ширины жилы, обеспечивающее достаточную площадь для капли припоя *2*, который соединяет штырь и жилу, что обеспечивает необходимую механическую и электрическую прочность. Конец многослойного печатного провода *5* (рис. 10.32, *б*) разделывают ступенчато для установки штырей, представляющих собой контакты. Штыри припаивают к верхнему слою проводников каждой ступеньки. Отверстия *6* для установки штырей просверливают с увеличенным диаметром, чтобы не было электрического контакта штырей с жилами нижних слоев, по этой же причине хвостовики штырей покрываются лаком.

Готовые соединительные устройства должны быть надежно упакованы при межоперационной транспортировке. Ленточный провод складывают и сворачивают в спираль, диаметр которой исключает перелом или остаточную деформацию провода. Спираль провода закладывают в кассету, а концы провода с соединителями пропускают через паз и закрепляют зажимами. Кассету закрывают крышкой. На соединители надевают плотные пластмассовые или резиновые защитные заглушки.

10.4. Размещение ленточных проводов в ЭА

Одним из основных преимуществ ленточных проводов является простота их монтажа в аппаратуре. При разработке ЭА с использованием ленточных проводов необходимо учитывать конкретные марки и характеристики ленточных проводов, особенности их планарной конструкции, строго определяющей место каждой жилы провода в пространстве.

Ленточные провода применяют при внутриблочном и межблочном монтаже аппаратуры, к которой предъявляются жесткие требования по ограничению массы и габаритов. Ленточные провода рекомендуется использовать в конструкциях с выдвижными или шарнирно-закрепленными блоками. В этих случаях у них должны быть участки в виде спирали или гармошки. Рассмотрение вопросов применения ленточных проводов необходимо проводить на этапе эскизного проектирования ЭА.

При проектировании электрического монтажа из ленточных проводов необходимо предусмотреть свободные, незадействованные электрически жилы (до 10 % от общего числа жил) для возможных последующих изменений или доработок в схеме.

Ленточные провода монтируют в аппаратуре с помощью крепежных элементов, исключающих механические воздействия на изоляцию, а также с помощью клеев и лаков, не влияющих на изоляцию. Для предохранения

ленточных проводов от механических повреждений в местах их прохода через стенки металлических шасси предусматриваются изоляционные втулки или отбортовки. При огибании проводами ребер также следует ставить предохранительные детали из изоляционных материалов. Ленточные провода позволяют проводить ввод в соединительные и в разветвительные коробки. Окончательный монтаж ленточных проводов заключается в группировании и разводке проводов согласно монтажной схеме и их закреплении.

Способы прокладки ленточных проводов

Прокладку ленточных проводов осуществляют в воздухе (горизонтальная, вертикальная), по поверхности металла или диэлектрика. Прокладка проводится одно- и многослойной с переменой направлений в одной плоскости и в пространстве. Для изменения направления прокладки провода при монтаже или создания ответвлений используются методы изгиба проводов, приведенные на рис. 10.33.

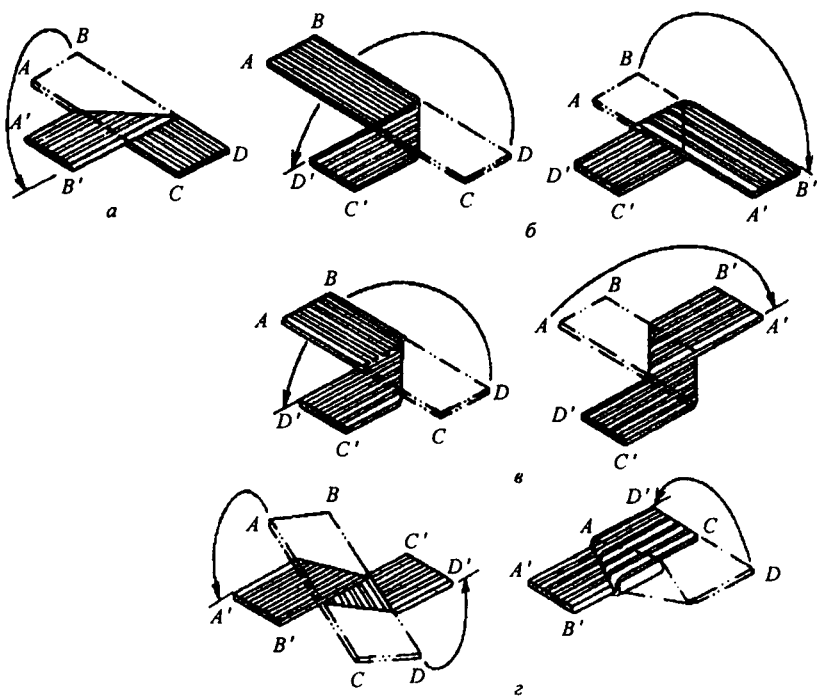


Рис. 10.33. Монтаж ленточных проводов методом сгибания:

а — изгиб провода на 90°; *б* — двойной изгиб провода с изменением его направления; *в* — смещение провода на его ширину; *г* — изменение положения жил провода

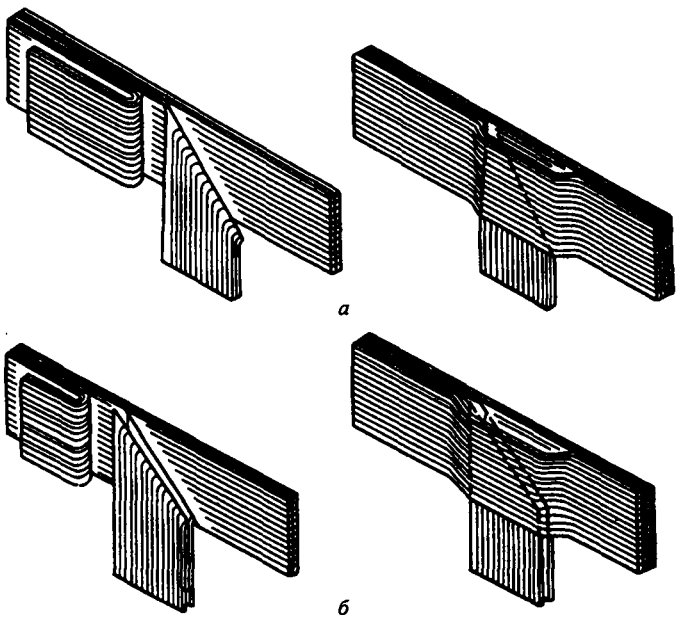


Рис. 10.34. Создание ответвлений в многослойном проводе:
а — групповое сгибание проводов; *б* — сгибание отдельных проводов

Для создания ответвлений в многослойном проводе используется групповое сгибание провода (рис. 10.34, *а*), что обеспечивает более компактную, плотную разводку при меньшем числе открытых краев. Создание ответвлений сгибанием отдельных ленточных проводов (рис. 10.34, *б*) облегчает монтаж, удаление и замену отдельных устройств. Рекомендуется сгибать не более 10 проводов.

Если требуется развести больше 10 проводов, монтаж следует вести в два параллельных жгута. Ответвления в отдельных проводах ленточного тканого провода осуществляются несколькими приемами: в период изготовления провода делают необходимое число ответвлений как скрепленных, так и не скрепленных нитями; вытягивают необходимое число проводов из тканого провода; расплетают тканый провод на отдельные ветви и т. п. Провода сгибают с помощью ручного инструмента с соответствующими сменными насадками, площадь и конфигурация которых определяется шириной провода, формой места изгиба и радиусом изгиба.

При монтаже однослойного печатного провода, несущего на своей изогнутой поверхности жилы, во внутренних углах возникают местные напряжения, и пленка может порваться. Для снижения концентрации напряжений в углах переходов необходимо пробивать отверстия. При изгибе мно-

гослойного печатного провода, слои которого склеены, следует избегать применения клея в местах изгибов. Иначе там возникнут напряжения среза, которые могут нарушить изоляцию и даже привести к разрыву жил.

Способы закрепления ленточных проводов

Ленточные провода закрепляют зажимами и клеем. При применении зажимов замена провода не вызывает больших затруднений. Основные требования к крепежным зажимам: они не должны повреждать изоляцию провода (желательно иметь унифицированные зажимы в зависимости от ширины провода); быть пригодными для монтажа с помощью простых и доступных инструментов; выдерживать климатические и механические нагрузки.

Монтаж с помощью клея применяют для небольших проводов постоянного закрепления. Такой метод обеспечивает хорошую компактность (нет дополнительных зажимов), однако приклеенные провода трудно в последующем заменить.

Зажимы в виде скоб обеспечивают наиболее надежное крепление проводов и позволяют сравнительно легко проводить их демонтаж и перестановку. Применяют скобы металлические и неметаллические. Их изготавливают по форме провода, они должны плотно охватывать провод и не допускать его перемещения относительно корпуса.

Крепление ленточного провода *1* с помощью металлической скобы *2* приведено на рис. 10.35, *а*. Для предотвращения повреждения провода место крепления обертывается несколькими слоями липкой ленты *3*. Крепление провода *1* к шасси *4* через технологические отверстия с помощью ниток *5* показано на рис. 10.35, *б*. На нитки надевается эластичная изоляционная трубка *6*.

Пример фиксации одиночного провода зажимом приведен на рис. 10.36. Двухэлементные зажимы *2*, *4* (рис. 10.37) применяют для фиксации наборов

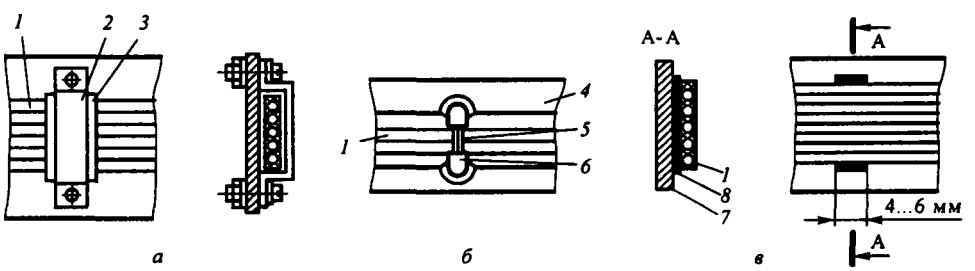


Рис. 10.35. Крепление ленточных проводов к шасси:
а — скобами; *б* — нитками; *в* — клеем; *1* — провод; *2* — скоба; *3* — липкая лента; *4* — шасси; *5* — нитки; *6* — трубка; *7* — корпус; *8* — клей

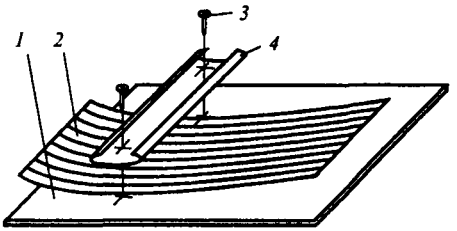


Рис. 10.36. Фиксация одиночного провода:

1 — несущая конструкция; *2* — ленточный провод; *3* — винт; *4* — зажим

проводов. Круглые в сечении эластичные прокладки *6* зажимов, выполняя функции амортизаторов, защищают изоляцию провода от повреждения при вибрациях.

Крепление провода *1* к корпусу *7* при помощи клея *8* показано на рис. 10.35, *в*. Расстояние между точками приклеивания провода к поверхности корпуса зависит от ширины провода и составляет 40 мм для провода шириной 5 мм; 60 мм для провода шириной 5...10 мм; 80 мм для провода шириной 10...15 мм; 100 мм для провода шириной 15...25 мм; 140 мм — для кабеля шириной 25...40 мм и 200 мм — для кабеля шириной свыше 40 мм.

Для крепления ленточных проводов любой ширины рекомендуется использовать односторонние нейлоновые зажимы. К шасси зажимы крепятся при помощи клея. Достоинством таких зажимов является возможность быстрой замены и перемонтажа проводов.

Для скрепления проводов между собой следует применять липкую ленту, которой обертывают в 2—3 слоя провода, наложенные друг на друга. Для этого можно использовать и клей, который наносят между проводами полоской в 4—5 мм. Крепление параллельно расположенных проводов можно проводить, если это не вызывает недопустимого увеличения наводок.

Пример крепления ленточного провода в аппаратуре приведен на рис. 10.38. Провод *1* закрепляется на основании *4* с помощью опорного уголка или швеллера *3* и зажима *2*. В необходимых местах устанавливают

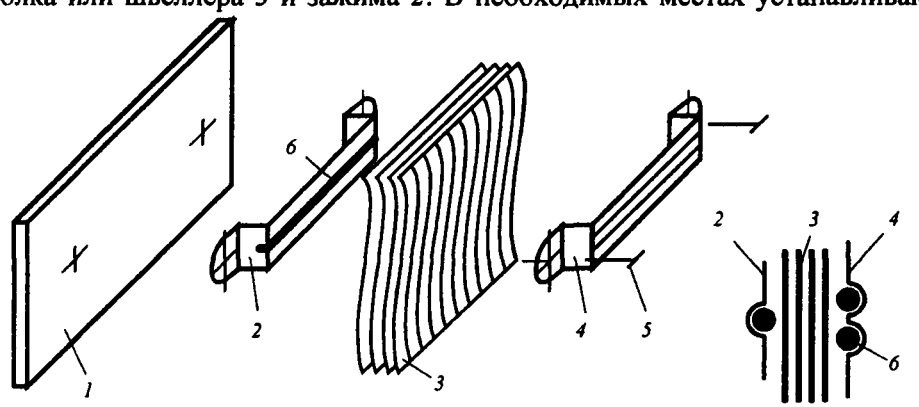


Рис. 10.37. Крепление набора ленточных проводов:

1 — несущая конструкция; *2*, *4* — зажим; *3* — набор проводов; *5* — винт; *6* — прокладка

дополнительные опоры для крепления провода. Для изменения направления провода необходимо его изогнуть. Провода должны быть защищены от повреждений, вызываемых трением его о поверхность, ребро или край и т. п. В местах прокладки ленточных проводов через стенки металлических шасси должны быть установлены изоляционные втулки или отбортовки, а при огибании ребер конструкции — предохранительные бандажи из изоляционных материалов.

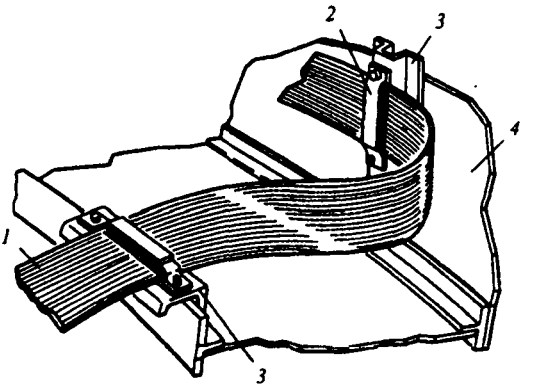


Рис. 10.38. Крепление ленточных проводов в аппаратуре:

1 — провод; *2* — зажим; *3* — уголок, швеллер; *4* — основание

Во многих случаях для обеспечения необходимой прочности и надежности монтажа соединительные устройства дополнительно крепят к шасси или печатным платам винтами (через уголки и скобы), проволокой и т. п.

Монтаж ленточных проводов в подвижных блоках

Гибкие ленточные провода можно использовать для электрических соединений между неподвижными и подвижными блоками шарнирной или выдвигаемой конструкции. Для этого удобно использовать провода, которые вытягиваются и снова убираются до своего первоначального размера (возвращаются в исходное положение).

Ленточный провод *1* в виде «змейки» используют для электрической связи с выдвижным блоком *2* в стойке (рис. 10.39). Штриховыми линиями показано положение блока и ленточного провода при выдвинутом положении блока.

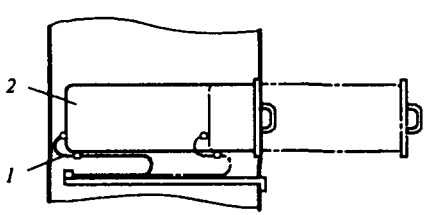
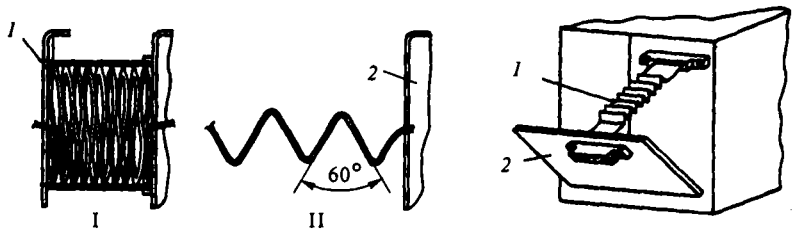


Рис. 10.39. Укладка провода «змейкой» для подвижных блоков:

1 — провод; *2* — выдвижной блок

Схема укладки ленточного провода в виде «гармошки» *1* приведена на рис. 10.40. Такая укладка позволяет выдвигать подвижной блок *2* на бóльшее расстояние, чем в предыдущем случае. Провод *1* в уложенном положении (позиция I) занимает 32 см; в крайнем рабочем положении — 4,5 м (позиция II), в полностью растянутом положении провод имеет длину около 9 м.



а *б*

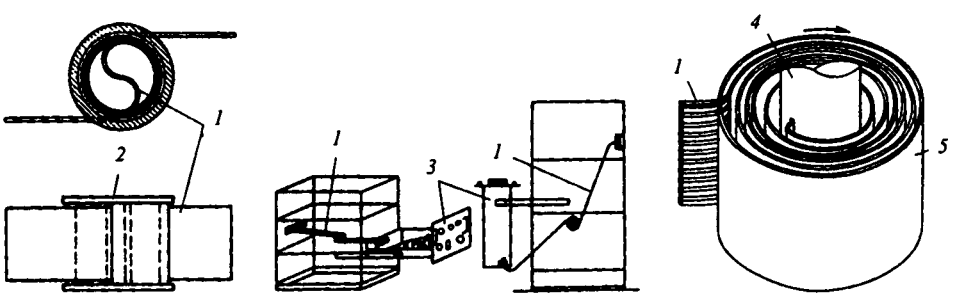
Рис. 10.40. Укладка провода «гармошкой»:

а — с выдвигаемым блоком; *б* — с блоком шарнирной конструкции; *1* — провод; *2* — блок

Соединение блока *2* шарнирной конструкции с соединенным устройством в виде «гармошки» *1* приведено на рис. 10.40, *б*.

Наибольшую компактность обеспечивает соединение подвижных блоков ленточным проводом, свернутым в спираль. На рис. 10.41 приведены внешний вид спирали ленточного провода *1* в каркасе *2* и примеры соединения подвижных блоков *3* проводом *1*, сворачиваемым в спираль.

Физико-механические свойства некоторых ленточных проводов позволяют использовать их в тех случаях, где требуется передача электрических сигналов через вращающееся соединение (поворотные антенные устройства и т. п.). Схема применения ленточного провода *7* для поворотного устройства представлена на рис. 10.41, *в*. Здесь вращается либо корпус *5*, либо вал *4*.



а *б* *в*

Рис. 10.41. Соединение подвижных блоков ленточным проводом, свернутым в спираль:

а — спираль провода в каркасе; *б* — соединения с выдвижными блоками; *в* — использование ленточного провода для поворотного устройства; *1* — провод; *2* — каркас; *3* — подвижной блок; *4* — вал; *5* — корпус

Контрольные вопросы

1. Какие виды монтажа применяются при производстве ЭА?
2. Назовите способы комплектации элементов.
3. Назовите способы пайки печатных узлов.
4. Из каких элементов состоит соединительное устройство?
5. На какие виды разделяются ленточные провода?
6. Укажите основные способы снятия изоляции с ленточных проводов.
7. Какие способы пайки применяются при монтаже ленточных проводов?
8. Назовите способы крепления ленточных проводов.
9. Как осуществляется монтаж ленточных проводов в системах с подвиж частями?
10. Укажите назначение паяльных муфт.

11. РЕГУЛИРОВКА, НАСТРОЙКА, КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

11.1. Технологические операции регулировки и настройки

Регулировка и *настройка* — необходимые операции в общем технологическом цикле производства ЭА. Они должны обеспечить заданные параметры ЭА при наименьших затратах и устранить все неисправности, допущенные при сборке. Под регулировочными и настроечными операциями (РНО) понимают комплекс работ по доведению параметров ЭА до величин, соответствующих требованиям технических условий (ТУ) и нормалей. Целью РНО является получение такого разброса параметров, который гарантирует эффективное функционирование аппаратуры в условиях эксплуатации.

Проведение РНО необходимо, чтобы устранить погрешности изготовления деталей, элементов и сборки узлов, причем как вынужденных, так и предопределенных заранее. Причиной появления предопределенных погрешностей является искусственное завышение допусков на отдельные параметры в целях уменьшения себестоимости изделий или невозможности реализации требуемой точности.

Работы, выполняемые на РНО, включают настройку различных резонансных систем, сопряжение электрических, кинематических параметров отдельных узлов и всей аппаратуры в целом, установку определенных режимов отдельных блоков, узлов, подгонку некоторых элементов и т. д. Характер и объем РНО определяется видом и объемом производства, оснащенностью ТП.

Как этап производства РНО составляют в общем ТП ряд операций, не изменяющих схему и конструкцию изделия, а лишь компенсирующих неточность изготовления и сборки элементов ЭА собственного производства, а также комплектующих элементов. За счет такой компенсации достигается согласование входных и выходных параметров узлов и всех параметров изделия до оптимального значения, удовлетворяющего требованиям ТУ.

Если исключить РНО из ТП невозможно, то естественна постановка задачи минимизации затрат труда и времени. Общие пути решения такого рода задач известны — отработка методики выполнения РНО, их автоматизация, схемотехнические и конструктивные решения, сокращающие затраты на РНО.

Методы выполнения РНО

Различают эксплуатационную и заводскую регулировку. При опытном производстве процесс регулировки может сопровождаться частичным изменением схемы и конструкции образца. В серийном производстве процесс регулировки разбивают на ряд простых операций, кроме того, выполняют предварительную регулировку отдельных сборочных единиц. Это позволяет сократить трудоемкость работ, оснастить процесс регулировки специальными приборами. При регулировке иногда допускается методом подбора устанавливать заранее предусмотренные схемой резисторы, конденсаторы и другие элементы. Подбор электронных, полупроводниковых, механических приборов для получения оптимальных параметров в серийном производстве не допускается. В массовом производстве регулировочные работы разбивают на мелкие операции, предусматривающие получение одного или нескольких связанных друг с другом параметров с применением минимального количества приборов и инструментов. Замена установленных элементов исключается. Регулировку проводят на специализированных установках.

Регулировку ЭА осуществляют двумя методами:

- по измерительным приборам;
- сравнением настраиваемого изделия с образцом или эталоном (метод электрического копирования).

В серийном и массовом производстве чаще применяют метод электрического копирования, позволяющий уменьшать допуски на выпускаемую ЭА при использовании более простой измерительной аппаратуры.

Технологический процесс регулировки ЭА разбивают на ряд этапов. На первом этапе изделие подвергают тряске на вибрационном стенде для удаления посторонних предметов и выявления имеющихся неплотных соединений.

На втором этапе проверяют правильность монтажа. Для этого предварительно составляют карты или таблицы, охватывающие все цепи проверяемого устройства.

На третьем этапе проверяют режимы работы микросхем (МС), полупроводниковых приборов по электрокалибровочным картам. Проверку режимов начинают с источников питания.

На четвертом этапе проверяют функционирование устройства в целом и регулировку для получения заданных характеристик по ТУ.

Виды и перечень документации, необходимой для проведения регулировочных работ, определяются программой выпуска и сложностью изделия. В единичном производстве регулировку можно проводить по электрической схеме с учетом требований ТУ. Для регулировки сложных изделий и в массовом производстве создают документацию, исключающую ошибки и сокращающую трудоемкость выполняемых работ.

Правильность электрического монтажа проверяют по электрокалибровочным картам, которые составляют для напряжений и токов, и выполняют их в виде таблиц или чертежей.

При регулировке простых устройств и в массовом производстве используются технологические карты, в которых указаны методика и порядок регулировки, измерительная аппаратура, инструмент и т. д.

Наиболее часто для регулировочных работ используют технологическую инструкцию, которая содержит описание рабочего места, перечень измерительной и регулировочной аппаратуры, приспособлений и инструмента, методику процесса регулировки и его последовательность, характерные неисправности и способы их обнаружения и устранения, порядок сдачи отрегулированного узла и указания по технике безопасности.

Порядок оформления технологических карт и технологических инструкций определяет ГОСТ (ЕСТД. Правила оформления документов общего назначения).

Сущность регулировочных работ сводится к следующему. Имеется заданная функция, как правило, функция многих переменных $\xi = f(x, y, z, \ldots)$. Каждый из выходных параметров изделия представляет собой функцию многих переменных, т. е.

$$\xi_1 = f(x_1, y_1, z_1, \ldots);$$
$$\xi_2 = f(x_2, y_2, z_2, \ldots);$$
$$\ldots\ldots\ldots$$
$$\xi_n = f(x_n, y_n, z_n, \ldots),$$

где x, y, z — параметры входящих в схему деталей, элементов, узлов.

Цель регулировки — соблюдение условия по всем параметрам $|\xi_{0i} - \xi_i| \leqslant \Delta_{доп}$, где ξ_{0i} — номинальное значение выходного параметра, оговоренное ТУ; ξ_i — фактическое значение i-го параметра, полученное в результате регулировки; $\Delta_{доп}$ — допустимое значение погрешности i-го параметра.

Рассматривая в качестве объекта регулировки изделие в целом, можно РНО представить как процесс оптимизации, осуществляющий поиск экстремума некоторой обобщенной функции качества Q изделия j, опре-

деляемой или совокупностью значений варьируемых параметров $\rho_j\{x_j, y_j, z_j, \ldots\}$, или совокупностью частных функций качества q. К совокупности q можно отнести такие показатели, как статистическую погрешность системы, среднеквадратическую погрешность в определенном режиме работы, время переходного процесса и т. д. Если $Q = \sum_{i=1}^{n} q_i$, то частные функции качества желательно выбирать так, чтобы они определялись одним-двумя варьируемыми параметрами ρ_j: $Q = \sum_{j=1}^{n} q(\rho_j) \to \text{extr}$.

Все РНО можно классифицировать по тем признакам, которые применяют в качестве критериев решения задач от проектирования операций до способа их выполнения.

Таблица 11.1. **Классификация РНО**

Признак классификации	Вид РНО
По виду оптимизируемой функции качества	С оптимизацией функций качества: общих; частных; комбинированных
По методу поиска функции качества	С поисковой настройкой
	С аналитической настройкой
	С комбинированной настройкой
По способу поиска экстремума функции качества	С независимым поиском
	С зависимым поиском
По организации движения к экстремуму	С совмещенными шагами
	С разнесенными шагами
По виду используемой информации	По исходной информации
	По временным характеристикам
	По частотным характеристикам
	По информации о процессах на границе устойчивости
По методу движения к экстремуму	По методу Гаусса—Зейделя
	По градиентному методу
	По методу наискорейшего спуска
	Со случайным поиском
	Двухшаговым методом
	Методом сканирования

По виду оптимизируемой функции качества процессы регулировки подразделяются на процессы, оптимизирующие обобщенные, частные и комбинированные функции качества системы, подвергающейся регулировке или настройке.

Частные функции качества системы являются логической или аналитической зависимостью между фазовыми координатами настраиваемой системы (или некоторыми показателями ее качества в определенном типовом режиме работы) и информационными сигналами. Эта зависимость оптимизируется в процессе регулировки.

Обобщенные функции качества составляют логическую или аналитическую зависимость между регулируемыми координатами системы или совокупностью частных показателей ее качества для различных режимов работы системы и информационными сигналами. Эта зависимость также оптимизируется в процессе регулировки в одном из типовых режимов работы системы.

Комбинированные функции качества являются сочетаниями обобщенных и частных функций качества.

В зависимости от метода поиска экстремума функции качества РНО разделяются на процессы, использующие принципы поисковой настройки, аналитической настройки или сочетания принципов поисковой и аналитической.

При поисковой настройке (регулировке) изменение варьируемых параметров настраиваемой системы проводится в результате поиска условий экстремума оптимизируемой функции качества. Для пробных изменений параметров системы и последующего анализа результатов этих изменений необходимо вводить пробные (тестовые) сигналы. Поисковые системы регулировки по способу поиска экстремума оптимизируемой функции качества можно разделить на системы с независимым поиском, когда абсолютные значения скоростей изменения варьируемых параметров не зависят от отклонения текущего значения функции качества от экстремального значения, и системы с зависимым поиском, когда скорости изменения варьируемых параметров являются функциями отклонения текущего значения оптимизируемой функции качества от экстремального значения.

По организации движения к экстремуму поисковые системы регулировки делят на системы с разнесенными пробными рабочими шагами и системы с совмещенными пробными и рабочими шагами.

В первом случае при пробном шаге определяются направления изменения варьируемых параметров для обеспечения экстремума оптимизируемой функции качества, а при рабочем шаге проводится изменение варьируемых параметров. Во втором случае изменяются варьируемые параметры с одновременной оценкой влияния этих изменений на оптимизируемую функцию качества.

В зависимости от метода движения к экстремуму поисковые системы регулировки делят на системы регулировки с поиском экстремума по методам: градиента Гаусса—Зейделя, наискорейшего спуска, случайного поиска, сканирования и двухшагового.

При аналитической регулировке изменение варьируемых параметров настраиваемой системы проводится на основе аналитического определения условий, обеспечивающих заданное значение функции качества без применения специальных поисковых сигналов.

В аналитических (беспоисковых) системах регулировки для получения информации о состоянии настраиваемой системы, как правило, используются стимулирующие сигналы, имитирующие реальные сигналы, поступающие в систему в процессе функционирования. В некоторых случаях используются специальные пробные сигналы. По виду использования дополнительной информации они делятся на системы, использующие информацию о входном воздействии, частотных и временных характеристиках, процессах на границах устойчивости и комбинированную с использованием сочетаний указанных выше видов информации.

Критерии оценки качества РНО

Для того чтобы судить о качестве выполнения РНО, необходимо иметь критерий оценки качества, описание которого представляется некоторой функцией качества одного из рассмотренных видов.

Характеристикой качества РНО могут служить функции распределения погрешностей регулировки изделий или распределения их параметров с учетом установленного поля допуска. Поле рассеяния параметров изделий должно быть меньше или равно допустимому полю рассеяния: $3\Delta_i \leqslant 3\Delta_{доп}$. Выполнение этого условия можно осуществить двумя путями: отбором деталей (элементов, узлов) из общего поля допуска $\pm 3\Delta$, укладывающихся в допустимое поле допуска $\pm 3\Delta_{доп}$; организацией технологического процесса производства деталей (элементов, узлов), позволяющего выполнить условие $3\Delta_{доп} = 3\Delta_i$.

Установлены некоторые закономерности формирования выходных параметров в зависимости от особенностей электрических схем. Только небольшую часть распределений выходных параметров можно считать нормальными. Реальные распределения выходных параметров отличаются между собой и от нормальных главным образом из-за асимметричности и островершинности. Эти качественные характеристики распределений, оцениваемые коэффициентами асимметрии и эксцесса, использованы в качестве критериев при анализе электрических схем и выполнении РНО с учетом получаемых распределений.

В электрических схемах, где РНО осуществляются элементами настройки с плавно изменяющимися параметрами (потенциометры, перемен-

ные конденсаторы, подстроечные индуктивности), функции распределения выходных параметров хорошо согласуются с законом нормального распределения. Математическое ожидание таких распределений при отсутствии систематических погрешностей аппаратуры близко к нулевому номинальному значению параметра. Разброс выходных параметров настроенных изделий, характеризующийся средним квадратическим отклонением, во многом определяется случайными погрешностями измерений. Значения коэффициентов асимметрии и эксцесса близки к нулю.

При РНО электрических схем парным подбором элементов, имеющих дискретные и плавно изменяющиеся параметры, получаемые распределения характеризуются заметными асимметричностью и эксцессом. Поля рассеяния параметров на 25...35 % меньше поля установленного допуска.

Еще бóльшую асимметричность и островершинность могут иметь распределения выходных параметров изделий, в которых РНО осуществляются подбором элементов с дискретными параметрами.

Взаимозависимые РНО выполняют посредством подбора параметров двух или более элементов, один из которых может быть общим для нескольких независимых электрических цепей. Сюда входят разнообразные многопредельные схемы делителей сигналов с частотной компенсацией, различные схемы генераторов фиксированных частот, имеющие общие элементы колебательных контуров, многопредельные задающие временные устройства. В таких схемах перестройка или замена элементов отражается на всех параметрах изделия, зависящих от этих элементов. Эта особенность взаимозависимых регулировочных операций — одна из причин значительного отклонения получаемых распределений от нормальных. Математическое ожидание выходных параметров может сильно отличаться от номинального значения. Асимметричность распределений явно выражена и может быть как право-, так и левосторонней. В большинстве случаев знак асимметрии определяется порядком проведения настройки схемы, который при взаимозависимых РНО строго определен технологическими инструкциями. Эксцесс, как и в предыдущих случаях, как правило, положителен, что может быть объяснено стремлением регулировщика установить параметры схемы как можно ближе к номинальному значению. Характерно и то, что при взаимозависимых РНО практически исчезает разница между шириной поля допуска и фактическим рассеянием параметров после настройки изделий.

Выборочные асимметрии и эксцесс распределения сами по себе величины случайные и поэтому даже для нормального распределения могут быть равными нулю. Для оценки значимости отклонения коэффициентов асимметрии и эксцесса от своих математических ожиданий используем дисперсии этих величин, определяемые по формулам

$$D(A)=\frac{G(N-1)}{(N+1)(N+3)};$$

$$D(E)=\frac{24N(N-2)(N-3)}{(N+1)^2(N+3)(N+5)},$$

где $D(A)$, $D(E)$ — дисперсии выборочных асимметрии и эксцесса соответственно; N — объем выборки.

Начальные распределения выходных параметров изделия, прошедшего РНО, являются усеченными распределениями, поле рассеяния которых в ряде случаев существенно меньше поля установленного допуска. Оценку полей рассеяния параметров при выполнении РНО проведем с помощью безразмерной величины χ:

$$\chi=\frac{|\Delta_1-\Delta_2|-|\delta_1-\delta_2|}{\Delta_1-\Delta_2}100\,\%$$

Здесь Δ_1, Δ_2 — границы допуска, установленного ТУ на параметр; δ_1, δ_2 — границы поля рассеяния параметров после регулировки изделия.

При решении практических задач, если асимметричность и островершинность реальных распределений являются существенными, хорошее аналитическое приближение можно получить, воспользовавшись рядом Грама-Шарлье

$$f_A(U)=\sum_{i=0}^{\infty}C_i\varphi^i(U),$$

где $f_A(U)$ — плотность нормированной и центрированной величины, $U=\frac{\xi^*-m_0}{\sigma_0}$; ξ^* — значение выходного параметра после проведения РНО; m_0, σ_0 — математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение параметров; $\varphi^i(U)$ — i-я производная $\varphi(U)$ по U:

$$\varphi(U)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-U^2/2};$$

$$C_i=\frac{(-1)^i}{i!}\int_{-\infty}^{\infty}H_i(U)\varphi(U)dU;$$

$H_i(U)$ — полином Эрмита.

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы и обобщения:

• на формирование распределений выходных параметров изделий существенное влияние оказывают особенности электрических схем и РНО. Выходные параметры могут быть сгруппированы по принципу подобия получаемых распределений с установлением пределов изменения их численных характеристик;

• при двустороннем ограничении параметров допусковыми значениями получаемые распределения в большинстве своем представляют собой одномодальные усеченные распределения, отличающиеся от нормальных асимметричностью и островершинностью;

• обособленные РНО, осуществляемые элементами с плавно изменяющимися параметрами, характеризуются распределениями, близкими к нормальным, ширина поля рассеяния которых существенно меньше ширины поля установленного допуска.

11.2. Контроль, диагностика ЭА

Контроль в процессе производства ЭА

Под качеством ЭА понимают совокупность свойств, определяющих способность изделий удовлетворять заданным требованиям потребителя. Качество ЭА обусловливает их конструктивные, технологические, экономические, эргономические и другие параметры. Качество как свойство закладывается в процессе разработки и изготовления ЭА, а объективно оценивается в процессе эксплуатации. Однако получаемая при этом информация является, во-первых, недостаточной, поскольку не все параметры ЭА, необходимые для оценки качества, измеряются в условиях эксплуатации, а во-вторых, — запоздалой, так как на изготовление ЭА уже затрачены большие средства. Эта проблема усугубляется по мере дальнейшей микроминиатюризации ЭА, когда целые блоки выполняются в виде интегральных микросхем (ИС), которые являются неремонтопригодными.

Одним из методов оценки качества служат теоретические расчеты. Однако расчетные оценки нуждаются в экспериментальном подтверждении, так как исходные данные и модели являются приближенными. С развитием микроминиатюризации и усложнением ЭА создание адекватных моделей становится проблематичным. В этой связи существенный объем информации о качестве ЭА получают путем контроля их параметров и проведения испытаний на всех этапах, начиная с разработки нормативно-технической документации (НТД) и кончая анализом рекламаций и заключений потребителя о качестве готовых изделий.

Согласно Государственному стандарту (ЕСТПП. Виды процессов контроля) устанавливаются следующие виды технологических процессов технологического контроля:

- по унификации (единичный, унифицированный);
- по освоению процесса (рабочий, перспективный);
- по степени регламентации действий, устанавливаемых в документации (маршрутный, операционный, маршрутно-операционный).

Принадлежность процесса к единичному или унифицированному определяется количеством наименований объектов контроля, охватываемых процессом (один или группа однотипных или разнотипных объектов контроля).

Единичный процесс контроля применяют для изделий одного наименования, типоразмера и исполнения, а также для технологических процессов одного содержания независимо от типа производства.

Унифицированный процесс контроля в зависимости от общности конструктивных и технологических контролируемых признаков объектов бывает типовым и унифицированным.

Унифицированный типовой процесс контроля используют: в качестве рабочего процесса контроля при наличии в документации описания всех операций; как информационную основу при разработке рабочего процесса контроля; как базу для разработки стандартов на типовые процессы контроля.

Унифицированный групповой процесс контроля применяют: в качестве рабочего процесса контроля при наличии в документации описания всех операций; как информационную основу при разработке группового рабочего процесса контроля.

Рабочий процесс контроля используется для конкретных объектов в соответствии с требованиями рабочей технической документации.

Перспективный процесс контроля разрабатывается как информационная основа для рабочих процессов контроля при переоснащении производства и рассчитан на применение более совершенных методов контроля, более производительных и экономически эффективных средств контроля и на изменение принципов организации технического контроля.

Применение маршрутного, операционного или маршрутно-операционного процесса контроля устанавливается в отраслевых стандартах или в стандартах предприятия.

Государственный стандарт устанавливает следующие объекты контроля: материал, полуфабрикат, заготовка, деталь, сборочная единица, комплекс, комплект, технологический процесс.

При контроле материала, полуфабриката, заготовки и детали в состав контролируемых объектов включены: марка материала (кроме объекта деталь), геометрические и физико-химические параметры, внешние и внут-

ренние дефекты, клейма (кроме объекта материал). Для сборочной единицы, комплекса и комплекта предусмотрен контроль геометрических и функциональных параметров, внешних и внутренних дефектов и клейм, а для технологического процесса — контроль качественных и количественных характеристик. Следует также подвергать проверке упаковку, комплектность, консервацию и сопроводительную документацию, если это предусмотрено ТУ.

При контроле технологических процессов допускается проверка параметров вспомогательных материалов, средств технологического оснащения, в том числе средств контроля, технологической дисциплины, точности и стабильности ТП, характеристики внешних условий. По усмотрению разработчика допускается контролировать другие признаки (эргономические, эстетические и т. д.).

Процессы контроля должны обеспечивать решение задач, установленных для входного, операционного и приемочного контроля, и охватывать весь ТП и его результаты, предотвращать попадание дефектных заготовок и изделий на последующие этапы изготовления.

При *входном контроле* решают задачи проверки соответствия качества материалов, полуфабрикатов, заготовок, комплектующих деталей и сборочных единиц требованиям, установленным в стандартах, ТУ, договорах о поставках. Входной контроль на предприятии-потребителе осуществляет специальное подразделение.

При *операционном контроле* решают задачи проверки соответствия контролируемых признаков деталей и сборочных единиц в процессе изготовления предъявляемым к ним требованиям, а также выявляют количественные и качественные характеристики ТП. Операционный контроль осуществляет исполнитель операции (рабочий, бригадир, испытатель), руководитель участка (мастер, старший мастер), контролер или мастер отдела технического контроля.

При *приемочном контроле* решают задачи проверки соответствия качества готовых изделий требованиям, установленным в нормативно-технической документации, в том числе комплектность, упаковку и консервацию изделий, ее пригодность к транспортированию и использованию. Приемочный контроль осуществляют контролер, мастер ОТК и (при необходимости) представитель заказчика.

Процессы контроля подразделяют на четыре категории, применяемые по усмотрению предприятия. По полноте охвата контролером любая категория контроля подразделяется на сплошной и выборочный контроль, а по связи с объектом контроля — на непрерывный, периодический и летучий.

Сплошной контроль применяют в условиях особо высоких требований к уровню качества изделий, у которых абсолютно недопустим пропуск дефектов в дальнейшее производство или эксплуатацию.

Выборочный контроль применяют для изделий, когда их количество достаточно для получения выборок с установленным риском поставщика и потребителя, при большой трудоемкости контроля, а также при контроле, связанном с разрушением изделий, и на операциях, выполняемых на автоматических и поточных линиях. Как правило, пользуются статистическими методами контроля.

Непрерывный контроль применяют для проверки ТП в случаях их нестабильности и необходимости постоянного обеспечения определенных количественных и качественных характеристик. Как правило, используют автоматические или полуавтоматические средства контроля.

Периодический контроль (сплошной или выборочный) применяют для проверки изделий и ТП при установившемся производстве и стабильных ТП.

Летучий контроль (только выборочный) применяют для малоответственных изделий и ТП.

Государственный стандарт (ЕСТПП. Правила разработки процессов контроля) устанавливает основные положения и этапы разработки процессов и операций технического контроля, а также задачи на этапах их разработки при технологической подготовке производства.

Технический контроль (ТК) является неотъемлемой составной частью ТП изготовления изделия и разрабатывается в виде процесса ТК, операции ТК. Под техническим контролем понимается совокупность технологических операций ТК, выполняемых при изготовлении изделия и его составной части. Процессы ТК разрабатываются для входного контроля материалов, заготовок, полуфабрикатов, а также комплектующих деталей и сборочных единиц; операционного контроля деталей и сборочных единиц; приемочного контроля изделий.

Операции ТК разрабатывают для входного контроля несложных объектов, операционного контроля ТП или обрабатываемой заготовки после завершения определенной технологической операции. Процессы (операции) ТК разрабатывают вместе с ТП изготовления изделия с обеспечением необходимой взаимосвязи и взаимодействия между ними. Уровень автоматизации и механизации процессов (операций) ТК должен отвечать требованиям ТП изготовления изделия, условиям и типу производства.

При разработке процессов (операций) ТК необходимо обеспечить единство конструкторских, технологических и измерительных баз. Операции ТК должны предусматривать получение информации для регулирования ТП, а также обеспечивать предупреждение с заданной вероятностью пропуска дефектных материалов, заготовок, полуфабрикатов, деталей и сборочных единиц для последующего изготовления изделия. Процессы (операции) ТК должны соответствовать требованиям техники безопасности и промышлен-

ной санитарии, а также Государственным стандартам и согласовываться с отделом технического контроля.

Порядок разработки процессов (операций) ТК включает 17 этапов: 1) анализ задания на разработку процесса (операции) ТК; 2) классификация объектов контроля; 3) выбор объектов контроля; 4) группирование объектов контроля по метрологическим признакам; 5) группирование объектов контроля; 6) количественная оценка групп изделий (объектов контроля); 7) выбор действующего типового, группового процесса ТК или поиск аналога единичного процесса ТК; 8) составление технологического маршрута процесса ТК; 9) выбор контролируемых параметров; 10) разработка технологических операций ТК; 11) определение объема контроля; 12) выбор схем контроля; 13) выбор метода контроля; 14) выбор средств контроля; 15) расчет точности, производительности и экономической эффективности вариантов процессов (операций) ТК; 16) оформление документации на процессы (операции) ТК; 17) разработка документации результатов контроля.

Задачи, решаемые на каждом этапе, и основные документы, обеспечивающие решение этих задач, изложены в ГОСТе. Необходимость каждого этапа, состав задач и последовательность их решения определяются разработчиком процесса ТК в зависимости от условий производства или устанавливаются стандартами предприятия.

Нормативно-технические документы на ТК в общем случае включают стандарты «Технический контроль. Термины и определения», «Средства контроля. Термины и определения», «Правила разработки процессов (операций) технического контроля», «Правила выбора средств контроля»; классификатор объектов контроля; классификатор технологических операций технического контроля; методику выбора объектов контроля; методику размещения постов контроля по технологическому процессу изготовления и ремонта изделий; методику выбора контролируемых параметров; методику выбора схемы контроля; методику выбора метода контроля; стандарты типовых процессов (операций) технического контроля.

Программные и аппаратные методы контроля и диагностики ошибок и настройки

При использовании современной элементной базы, и особенно микропроцессоров, проблемы настройки и регулировки в традиционном понимании практически отсутствуют. Контроль, диагностику и настройку ЭА проводят программными и аппаратными методами. Предприятия и фирмы изготовители ЭА, ЭВМ и персональных компьютеров разрабатывают специальные инструкции для пользователей и диагностические программы, которые прилагаются к изделиям в виде технического описа-

ния, инструкции пользователя, встроенного программного обеспечения или специальных программ на магнитных или лазерных носителях информации.

Для широко распространенных в настоящее время компьютеров IBM PC, XT, AT, PS/2 и для всех IBM-совместимых моделей существует несколько разновидностей диагностических программ. Эти программы применяют при диагностике неисправностей как компьютеров в целом, так и их отдельных компонентов. Во многих случаях такие программы могут проделать бóльшую часть работы по определению дефектного узла. Их можно условно подразделить на три группы: POST (Power-On Self Test — процедура самопроверки при включении), специализированные и общего назначения. Сложность программ и их потенциальные возможности на каждой последующей ступени, как правило возрастают.

Программа POST. Эта программа предназначена для повышения надежности ЭВМ наряду с контролем на четность памяти. Эта программа представляет собой последовательность коротких программ «зашитых» в ПЗУ BIOS (Basic Input Output System — базовая система ввода-вывода) на системной плате и предназначенных для проверки всех основных компонентов системы непосредственно после ее включения. Процедура POST выполняется перед загрузкой операционной системы и запускается всякий раз, когда включают компьютер.

Процесс самопроверки при включении (POST). Автоматически выполняется некоторая последовательность операций по проверке различных компонентов компьютера. Обычно проверяются центральный процессор, ПЗУ, вспомогательные схемы системной платы, оперативная память и основные периферийные устройства. Эти тесты выполняются быстро и не слишком тщательно по сравнению с диагностическими программами, записанными на дисках. Если при выполнении процедуры POST обнаруживается неисправный компонент системы, то выдается сообщение об ошибке или предупредительный сигнал.

Хотя диагностика, выполняемая процедурой POST, не очень подробная, она представляет собой первую ступень защиты системы, особенно в тех случаях, когда обнаруживаются серьезные неисправности системной платы. Если окажется, что неисправность достаточно серьезная, то дальнейшая загрузка системы приостанавливается и выдается сообщение об ошибке, по которому чаще всего можно сразу определить причину возникшей неисправности. Такие неисправности иногда называют «*фатальными ошибками*» (fatal errors). Процедурой POST обычно предусматривается три способа индикации неисправности: звуковые сигналы, сообщения, выводимые на экран монитора, и шестнадцатеричные коды, посылаемые по адресам портов ввода/вывода.

Звуковые коды ошибок, обнаруживаемых процедурой POST. При обнаружении ошибки процедурой POST компьютер издает характерные звуковые сигналы, по которым можно определить неисправный элемент или группу элементов. При нормальной работе компьютера подается один короткий сигнал после проверки процедурой POST. Если обнаруживается неисправность, то выдается серия коротких или длинных звуковых сигналов. Эти «коды Морзе» зависят от версии и фирмы разработчика BIOS. В табл. 11.2 приведены звуковые коды, используемые в компьютерах фирмы IBM, и неисправности, которым соответствует последовательность сигналов.

Таблица 11.2. **Звуковые коды ошибок процедуры POST в системах IBM**

Звуковые сигналы	Звук	Место возникновения неисправности
Один короткий	·	Нормальное завершение процедуры POST – система в порядке
Два коротких	··	Общее сообщение – код ошибки выведен на экран
Сигнал отсутствует		Источник питания, системная плата
Непрерывный	—	Источник питания, системная плата
Повторяющиеся короткие	·····	Источник питания, системная плата
Один длинный, один короткий	–·	Системная плата
Один длинный, два коротких	–··	Адаптер дисплея (MDA, CGA)
Один длинный, три коротких	–···	Улучшенный графический адаптер (EGA)
Три длинных	– – –	Плата клавиатуры 3270

Сообщения, выводимые процедурой POST на экран. В компьютерах XT, AT, PS/2 и в большинстве IBM-совместимых моделей при проведении процедуры POST на экране отображается процесс и результат проверки оперативной памяти системы. Последнее установившееся число обозначает объем памяти, успешно прошедшей проверку. Например, в компьютере XT может появиться сообщение: 640K OK. Выводимое на экран число должно совпадать с полным объемом памяти (основной и расширенной), установленной на системной плате. Например, в системе с 32 М установленной памяти на экран должно быть выведено сообщение: 32769KB OK.

ОЗУ, установленное на плате дополнительной (expanded) памяти, не проверяется процедурой POST, и никакого сообщения по этому поводу не выдается. Однако, если с помощью менеджера памяти (например, EMM386.EXE или QEMM фирмы Quarterdeck) конфигурировать установленную на системной плате расширенную (extended) память как дополнительную, то, так как процедура POST выполняется до загрузки упомянутых драйверов, ею будет учтена вся установленная память. Если тестирование

прекращается, а цифры на дисплее не соответствуют полному объему ОЗУ системы, то установившееся число, как правило, означает, насколько «глубоко» в оперативной памяти обнаружена ошибка. Это может существенно помочь при поиске неисправности.

Если во время выполнения процедуры POST обнаруживаются ошибки, сообщения о них выводятся на экран дисплея. Они обычно выглядят как цифровые коды, сопровождаемые отдельными словами, например 1790-disk 0 Error. В руководствах по эксплуатации и обслуживанию можно найти сведения неисправности какого компонента соответствует тот или иной код. Например, код 1790 обозначает ошибку считывания диагностического цилиндра жесткого диска 0. Полную таблицу кодов ошибок для различных компонентов персональных компьютеров читатель может найти в специальной литературе.

Малоизвестной особенностью процедуры POST является то, что в начале проведения каждой элементарной операции BIOS посылает соответствующие коды по заранее определенному адресу порта ввода/вывода. Эти коды могут быть прочитаны только с помощью специальной платы адаптера, вставляемой в один из слотов системной шины. Первоначально такие адаптеры были разработаны для тестирования системных плат в процессе производства — чтобы можно было их проверять, не устанавливая видеоадаптер и дисплей. В настоящее время некоторые фирмы стали выпускать такие адаптеры для сервисных целей. Если установить такую плату в слот, то во время процедуры POST на ее встроенном дисплее начинают быстро меняться двузначные шестнадцатиричные числа. Если система останавливается или зависает, то на двузначном дисплее платы можно увидеть код той операции (теста), во время которой произошел сбой или была найдена ошибка. Это позволяет существенно сузить круг дальнейших поисков неисправного элемента.

Тест-платы оказывают неоценимую помощь при диагностике неисправностей компьютеров, в которых системная плата абсолютно не функционирует при включенном источнике питания (слышен шум работающего вентилятора). Необходимо прочитать код на вставленной в слот тест-плате и по списку кодов, соответствующих установленной на системной плате версии BIOS, найти неисправный элемент.

Специализированные диагностические программы предприятий и фирм изготовителей выпускают большинство солидных предприятий и фирм изготовителей компьютеров, таких как IBM, Compaq, Hewlett-Packard и т. п. для своих вычислительных систем. Обычно это наборы тестов для «тотальной» проверки всех компонентов компьютера. Фирменная программа IBM для общего тестирования систем PS/2 записывается на установочной дискете, а для компьютеров других моделей — на отдельном диагно-

стическом диске. Фирмы Compaq и Hewlett-Packard также выпускают программы для технических специалистов, предназначенные для поисков неисправностей в соответствующих системах. Такие же программы можно найти в компьютерных справочных системах (BBS — Bulletin Board System) соответствующих фирм. Некоторые компании, например Dell и Gateway, выпускают сокращенные варианты таких программ, приспособленные для обслуживания их компьютеров.

Диагностические программы фирм-изготовителей обычно предусмотрены двух уровней. Первый уровень — это общая диагностика, которая в основном ориентирована на пользователей. Так как процедуры поиска неисправностей в большинстве современных систем достаточно просты, у пользователей обычно не возникает сложностей при работе с программами общей диагностики — даже при отсутствии соответствующей документации. Второй уровень — технический, и рассчитан на специалистов. Рассмотрим диагностические программы фирмы IBM.

Расширенная диагностика. Для проведения диагностики на техническом уровне фирма IBM выпускает для каждой системы руководства по эксплуатации и техническому обслуживанию с соответствующими программами расширенной диагностики. Для ПЭВМ PS/2 программа расширенной диагностики прилагается в установочной дискете (Reference Disk).

Сообщения об ошибках выводятся в виде чисел, по которым можно определить причину неисправности или сузить круг ее поисков. Используемые коды идентичны кодам процедуры POST, программы общей диагностики и вообще всех диагностических программ IBM.

В ПЭВМ PS/2 (модельный ряд с 25-й по 40-й) с шиной MCA (Micro Channel Architecture — один из стандартов системной шины, 16/32 разряда) расширенная программа диагностики находится в установочной дискете. После загрузки при нажатии клавиши Ctrl-A программа расширенной диагностики выводится на экран.

К системам PS/2 с другими системными шинами прилагается дискета запуска (Starter Disk). На ней записана программа первоначальной установки (SETUP) и упрощенная программа диагностики. Расширенные диагностические программы для компьютеров моделей 25, 30 и 30-286 записаны на дискетах, входящих в комплект изданий «Руководства по эксплуатации и обслуживанию компьютеров PS/2» («PS/2 HMS» — «PS/2 Hardware Maintenance and Service Manual»).

Наиболее полные сведения о процедурах поиска неисправностей и ремонте ПЭВМ содержатся в фирменном руководстве «IBM Hardvare Maintenance Service Manual».

Почти все коды ошибок, выводимые процедурами POST, общей и расширенной диагностики, состоят из условного кода устройства (компо-

нента системы) и последующего двузначного числа, не равного 00. Если после прохождения теста выводится код устройства и комбинация 00, то это значит, что проверка завершена успешно и неисправностей в данном компоненте не обнаружено.

Приводимый ниже список кодов ошибок и их описаний (табл. 11.3) составлен по материалам из различных источников.

Таблица 11.3. **Коды ошибок для различных компонентов ПЭВМ**

Код	Компонент
1xx	Системная плата
2xx	Память (ОЗУ)
3xx	Клавиатура
4xx	Адаптер MDA
4xx	Параллельный порт системной платы PS/2
5xx	Адаптер CGA
6xx	Контроллер накопителя на гибких дисках
7xx	Сопроцессор
9xx	Адаптер параллельного принтера
10xx	Вторичный адаптер параллельного принтера
11xx	Первичный асинхронный канал связи (последовательный порт COM1)
12xx	Вторичный асинхронный канал связи (последовательные порты COM2, COM3, COM4)
13xx	Игровой адаптер
14xx	Матричный принтер
15xx	Коммуникационный адаптер SDLC
16xx	Адаптер DSEA (модели 5520, 525x)
17xx	Контроллер и накопитель ST-506/412
18xx	Корпус-«расширитель»
19xx	Дополнительно подключаемые платы в 3270 PC
20xx	Адаптер BSC
21xx	Вторичный адаптер BSC
22xx	Cluster Adapter
23xx	Адаптер монитора Plasma
24xx	Адаптер EGA
24xx	Адаптер VGA на системной плате PS/2
25xx	Вторичный адаптер EGA
26xx	В XT и AT/370: адаптеры 370-M (памяти) или 370-P (процессора)
27xx	В XT и AT/370: адаптер эмуляции 3277-EM
28xx	Адаптер эмуляции 3278/79 или адаптер подключения 3270
29xx	Цветной или графический принтер
30xx	Первичный сетевой адаптер

Продолжение табл. 11.3

Код	Компонент
31xx	Вторичный сетевой адаптер
32xx	Адаптер дисплея и адаптер программируемых символов 3270 PC или AT
33xx	Компактный принтер
35xx	Адаптер EDSEA
36xx	Адаптер GPIB
38xx	Адаптер сбора данных
39xx	Адаптер PGA
44xx	Блок подключения дисплея 5278 и дисплея 5279
45xx	Адаптер интерфейса IEEE (IEEE-488)
46xx	Адаптер ARTIC Multiport/2
48xx	Встроенный модем
49xx	Вторичный встроенный модем
50xx	Жидкокристаллический дисплей PC Convertible
51xx	Портативный принтер PC Convertible
56xx	Система финансовой связи (Financial Communication System)
70xx	Специфические коды ошибок комплекта NC Phoenix BIOS
71xx	Адаптер голосовой связи (VCA)
73xx	Внешний накопитель на дискетах формата 3,5"
74xx	Адаптер дисплея IBM PS/2(плата VGA)
74xx	Адаптер дисплея 8514/A
76xx	Адаптер принтера 4216 Page Printer
84xx	Речевой адаптер PS/2
85xx	Адаптер памяти 2M XMA или адаптер дополнительной памяти (Expanded Memory Adapter)
86xx	Указатель координат PS/2 (мышь)
89xx	Адаптер MIDI
91xx	Адаптер оптического накопителя WORM IBM 3363
096xxxx	32-разрядный основной адаптер SCSI с кешем
100xx	Multiprotocol Adapter
101xx	Встроенный модем с быстродействием 300/1200 бит/с
104xx	Жесткий диск или адаптер ESDI
107xx	Внешний накопитель формата 5,25" или соответствующий адаптер
112xxxx	16-разрядный основной адаптер SCSI без кэша
113xxxx	Основной адаптер SCSI на системной плате (16-разрядный)
129xx	Модуль процессора модели 70; системная плата типа 3 (25МГц)
149xx	Дисплей и адаптер P70/P75 Plasma
165xx	Накопитель на магнитной ленте 6157 или адаптер для подключения подобного накопителя
166xx	Первичный адаптер сети Token Ring
167xx	Вторичный адаптер сети Token Ring
180xx	Адаптер PS/2 Wizard
194xx	Модуль расширения памяти 80286

Окончание табл. 11.3

Код	Компонент
208xxxx	Неизвестное SCSI –устройство
209xxxx	SCSI-накопитель со сменными дисками
210xxxx	SCSI-накопитель на жестком диске
211xxxx	SCSI-накопитель на магнитной ленте
212xxxx	SCSI-принтер
213xxxx	SCSI-процессор
214xxxx	SCSI-накопитель WORM
215xxxx	SCSI-накопитель CD-ROM
216xxxx	SCSI-сканер
217xxxx	SCSI-накопитель на оптических дисках
218xxxx	SCSI-проигрыватель с автоматической сменой дисков («музыкальный ящик»)
219xxxx	Коммуникационное устройство SCSI

Диагностические программы общего назначения выпускают несколько фирм, среди которых можно отметить пакеты программ Norton Utilities компании Symantec, MicroScope (Micro 2000), QAPlus (Diagsoft), PC-Probe (Landmark) и других фирм.

Большинство пользователей в основном имеют дело с программой POST и одной из программ общей диагностики. Хотя эти диагностические программы дорогие, они наиболее полные и работают с предназначенными для них компьютерами.

В настоящее время существует много диагностических программ для тестирования памяти, накопителей на гибких и жестких дисках, видеосистем и т. п. Они существенно расширены по сравнению со стандартной диагностической программой IBM. С их помощью удается точнее определить местоположение неисправности в системе (особенно в IBM-совместимых ПЭВМ). Для проверки последовательных и параллельных портов имеются тест-разъемы. Многие из этих программ можно запускать в режиме командной строки (в пакетном режиме), поэтому, без вмешательства оператора, может быть выполнена целая серия тестов. С помощью таких программ можно проверить все типы памяти — основную, расширенную и дополнительную, а также определить неисправности с точностью до отдельной микросхемы или разряда модуля SIMM.

Рассмотрим диагностические программные пакеты некоторых фирм.

AMIDIAG. Компания AMI (American Megatrends Inc.) выпускает наиболее популярные BIOS. В большинстве IBM-совместимых ПЭВМ используется AMI BIOS. Эта фирма выпускает также расширенный (дисковый) вариант диагностической программы AMIDIAG, которая является полно-

ценной программой общей диагностики, рассчитанной на использование во всех IBM-совместимых системах, а не только в тех, где установлено ПЗУ с AMI BIOS.

Checkit Pro. Этот пакет фирмы Touchstone Software Corp. состоит из набора программ, предназначенных для тестирования центрального процессора, основной, расширенной и дополнительной памяти, накопителей на жестких и гибких дисках, мыши, клавиатуры, а также видеоплаты и монитора (в том числе устройств, выполненных в стандарте VESA). Используется несколько версий пакета Checkit. Наиболее полной из них является комплект Checkit Pro Deluxe. Checkit Pro Analyst предназначен для работы в среде Windows. Некоторые фирмы-изготовители ПЭВМ чаще всего включают в комплекты своих систем пакет Checkit Plus — простейшую и наименее полную из версий. Для проверки быстродействия и «аттестации» системы возможности Checkit Pro Deluxe достаточно ограничены, но при этом можно получить детальную информацию о полном объеме установленной памяти, типе накопителя на жестком диске и его емкости, текущем распределении памяти (в том числе и в области верхней памяти — UMA), доступных используемых прерываниях, быстродействии факс-модема и другие сведения, полезные при поиске неисправностей в ПЭВМ. В пакет входит встроенный текстовый редактор, с помощью которого можно оперативно внести изменения в файлы CONFIG.SYS и AUTOEXEC.BAT. При работе в среде Windows точно так же могут быть отредактированы файлы SYSTEM.INI и WIN.INI.

Micro-Scope. Пакет Micro-Scope (Micro 2000) предназначен для IBM-совместимых ПЭВМ. Являясь полноценной диагностической программой общего назначения, она единственная из всех «знает» все о PS/2. С ее помощью удается отформатировать стандартные ESDI-накопители на жестких дисках, подключенные к ESDI-контроллеру PS/2. Программа Micro-Scope работает в обход DOS и BIOS. В ней есть своя операционная система, и при необходимости тестирование происходит без участия системной BIOS. Программа полезна для специалистов, занимающихся обслуживанием ПЭВМ, работающих под управлением не DOS, а, например, UNIX или в сетях Novell.

Кроме выше перечисленных существует много диагностических программ, в числе которых наиболее известные: Norton Diagnostics (NDIAGS), входящая в состав версии 8.0 пакета Norton Utilities; программа PC Technician фирмы Windsor Technologies; QAPlus/FE компании Diagsoft для тестирования ПЭВМ с процессорами 386, 486, Pentium и системы PS/2s; Service Diagnostics фирмы Landmark. Кроме того, имеются программы для диагностирования дисков и эталонные диски, предназначенные для оценки качества дисководов и их настройки. Это цифро-

вой диагностический диск (DDD), диагностический диск высокого разрешения (HRD — High-Resolution Diagnostic) и аналоговый диск для настройки позиционирования (AAD).

Для Windows 3.0, 3.1 и Windows 95 разработан пакет Norton Desktop, в который входит программа SYSINFO, позволяющая диагностировать накопители, память, видеоадаптер, принтер и т. д. и проводить аттестацию ПЭВМ, подсчитав ее общую производительность. Подобными свойствами обладают программы WinSleuth, WinSleuth Gold. Одной из наиболее полных диагностических программ для Windows является программа Winprobe фирмы Landmark.

11.3. Виды неисправностей ЭА и их устранение

Общие положения

Современная ЭА представляет собой сложное устройство, состоящее из совокупности элементов, составляющих определенное множество. Под элементами, принадлежащими множеству, понимается микросхема, электрорадиоэлемент (ЭРЭ), перемычка, пайка и так далее — все, от чего зависит исправность и работоспособность ЭА.

ЭА можно представить в виде «черного ящика», на входы которого поступает информация и напряжение питания, а на выходе появляется информация в виде электрического сигнала, звука, изображения и т. д.

Неисправность ЭА проявляется в виде искажения выходной информации или ее отсутствии (при наличии входного сигнала и напряжения питания). Источником неисправности могут быть один или несколько элементов, а также внешние воздействия и факторы, не входящие во множество элементов ЭА — пыль, влага, застывшие капли припоя и т. д. Неисправные элементы ЭА называются дефектными элементами. Каждый элемент (деталь) ЭА оказывает влияние на формирование выходных параметров. Зависимость между состояниями элементов ЭА 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 ЭА в ряде случаев облегчает нахождение неисправности.

Работу ЭА 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 ЭА 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 ЭА в следующих случаях:

- ЭА морально устарела, для нее уже не выпускают запасные детали, а установка нетиповых деталей требует значительных затрат времени, доработки конструкции и пр.;
- ЭА физически устарела, в ней заметно проявляются процессы старения материалов, снижение диэлектрических показателей изолирующих материалов, старение паек, высыхание оксидных конденсаторов и пр.;
- ЭА 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.

Классификация дефектов ЭА. От характера дефектов во многом зависят особенности их поиска. В первую очередь необходимо выяснить, име-

ется 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 ЭА, можно классифицировать по признакам: трудоемкости обнаружения; сложности; количеству; степени связанности; скорости проявления; особенности проявления; месту нахождения дефекта в одной из подсистем ЭА; 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 — ЭА 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 ЭА; 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 ЭА 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 ЭА при всех его достоинствах существенно увеличивает число разъемных соединений, а недостаточная надежность механических контактов повышает вероятность их отказов);
- нарушение технологической дисциплины при изготовлении ЭА (непропаи, качество монтажа и т. п.);
- нарушение условий эксплуатации: эксплуатация ЭА под действием прямых солнечных лучей, вблизи отопительных приборов или с закрытыми вентиляционными отверстиями; использование не предназначенных для данной ЭА предохранителей; неосторожное обращение с ЭА, повлекшее к падению, ударам; попадание внутрь ЭА 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 ЭА 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 ЭА: 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 подстроечных и регулировочных элементах, нарушение заводских пломб, нарушение герметизации и т. п.

Любой дефект, проявляющийся в ЭА, нарушает ее нормальную работу. Однако дефекты неравноценны, поэтому целесообразно установить последовательность их поиска и устранения, исходя из значимости.

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 строч-

ная (кадровая) синхронизация, неисправными считаются плата монохроматического адаптера или цветная графическая 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 микро-ЭВМ, 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 +5В наберет 90 %-ный 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 микро-ЭВМ);

контрольных сумм ROM;

битов констант и адресный тест 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. Диапазон значений напряжений в кабеле приведены в табл. 11.4. Кроме микро-ЭВМ в клавиатуре размещен дешифратор типа LS138 (аналог — ИС К533ИД7), несколько инверторов либо иных логических элементов, проверить которые несложно.

Таблица 11.4. **Значения напряжений в кабеле клавиатуры**

№ контакта	Аббревиатура	Параметры линии
В		
1	KBDCLK	Двунаправленная линия +(2,0...5,5)В
2	KBDDATA	Двунаправленная линия +(4,8...5,5)В
3		Резерв
4		Земля
5	+5 В	+(2,0...5,5) В

Средства локализации неисправностей, ремонт и отладка системных плат

Техник, проводящий ремонт электронного оборудования, руководствуется принципами, которые нелишне напомнить.

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 потребители. 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 может проводиться специальными подъемниками — экстракторами. Основная задача такого приспособления — 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, у которой наиболее известны 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.

11.4. Испытания ЭА

Испытания как основная форма контроля ЭА

Испытания ЭА 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 ЭА. К основным целям испытания, общим для всех видов ЭА, 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 ЭА, 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 ЭА устанавливает причины снижения качества. Если эти причины установить не удается, совершенствуют методы и средства контроля изделий и ТП их изготовления.

Для повышения качества выпускаемой ЭА 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 ЭА, а также условиями эксплуатации. Для контроля качества и приемки изделий устанавливают основные категории контрольных испытаний, оговоренные в ТУ: *приемо-сдаточные, периодические и типовые.*

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 прошедших метрологическую аттестацию.

Приемо-сдаточные 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 тренировки и предъявительских испытаний, выполненных по форме, принятой на предприятии-изготовителе.

Проводятся ПСИ в следующем составе и последовательности (пример 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 приемо-сдаточных и периодических.

Если эффективность и целесообразность предлагаемых изменений подтверждается 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 представителю 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 пара-

метры 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* (проводит научно-исследовательская организация заказчика).

Основным организационно-методическим документом при испытаниях ЭА является программа испытаний. Она регламентирует цели испытаний, объем и методику проводимых исследований; порядок, условия, место и сроки проведения испытаний; ответственность за обеспечение и проведение испытаний; ответственность за оформление протоколов и отчетов.

Общие цели контрольных, сравнительных и определительных испытаний, общие положения о 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 ЭА, требования к внешнему виду и электрические параметры. В разделах программы испытаний указывают объем и методику испытаний, в которых даются сведения о количестве испытываемых изделий, общая продолжительность испытаний при различных воздействующих факторах, о периодичности, составе и последовательности испытаний, о параметрах испытательных режимов, пределах изменения питающих напряжений и продолжительности работы ЭА 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 ЭА. В ней излагаются: метод, средства и условия испытаний, алгоритмы выполнения операций 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: проверку испытательного оборудо-

вания, подготовку испытываемых изделий, совместную проверку испытательного оборудования и испытуемого изделия, регистрацию результатов испытаний и данных об условиях их проведения.

Испытание на воздействие внешних факторов предназначено для определения с некоторой долей вероятности способности изделий 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 ЭА 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 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 испытательное оборудование.

Выбирая метод испытания, который следует применять, разработчик нормативно-технологической документации (НТД) должен всегда учитывать экономические аспекты, в частности, когда существует 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 соответствия изделий ЭА требованиям, установленным в ТЗ, стандартах и ТУ на изделия конкретных

классов и типов. Испытаниям подвергается ЭА 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. 11.5. Виды механических испытаний обозначены номерами 101—114, климатических — 201—220, 301 и 302, испытания на соответствие конструктивно-технологическим требованиям — 401—412.

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 требуется); заключительные проверки и измерения (если требуется).

Таблица 11.5. **Перечень рекомендуемых испытаний**

Номер испытания	Вид испытания	Необходимость проведения испытаний	
		На опытных образцах (опытных партиях), образцах из установочной серии, а также на изделиях серийного производства в случае изменения их конструкции, технологии или материалов	На изделиях серийного производства, проверяемых периодически, кроме изделий серийного производства в случае изменения их конструкции, технологии или материалов
1	2	3	4
100	Испытания по определению резонансных частот конструкции	+	–
101	Испытания на проверку отсутствия резонансных частот конструкции в заданном диапазоне	+	–
102	Испытание на устойчивость при воздействии синусоидальной или широкополосной случайной вибрации (испытание на виброустойчивость)	+	Н

Продолжение табл. 11.5

1	2	3	4
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 вибропрочность кратковременное)	–	Н
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
107	Испытание на воздействие линейного ускорения	+	–
108	Испытание на воздействие акустического шума	+	–
109	Испытание выводов на воздействие растягивающей силы	+	Н
110	Испытание гибких проволочных и ленточных выводов на изгиб	+	Н
111	Испытание гибких лепестковых выводов на изгиб	+	Н
112	Испытание гибких проволочных выводов на скручивание	+	Н
113	Испытание резьбовых выводов на воздействие крутящего момента	+	Н
114	Испытание на воздействие синусоидальной вибрации с повышенным значением амплитуды ускорения	+	–
201	Испытание на воздействие повышенной рабочей температуры среды	+	+

Продолжение табл. 11.5

1	2	3	4
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 плесневых грибов	+	–
215	Испытание на воздействие соляного тумана	+	–
216	Испытание на воздействие статического гидравлического давления	+	Н
217	Испытание на водонепроницаемость	+	Н
218	Испытание на воздействие дождя	+	–
219	Испытание на каплезащищенность	+	–
220	Испытание на водозащищенность	+	Н
301	Испытание на воздействие агрессивных сред (сернистого газа или сероводорода, озона)	+**	–

Окончание табл. 11.5

1	2	3	4
302	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

Примечание: + — 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 изменение 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).

Рассмотрим особенности проведения основных испытаний. Характеристика внешних воздействующих факторов, действующих на ЭА в процессе эксплуатации, приведена в гл. 2.

Испытания ЭА на механические воздействия

Все механические испытания ЭА проводят в нормальных климатических условиях под электрической нагрузкой или без нее или в условиях ис-

пытаний, 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 ЭА 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 ЭА, 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 $2f_в$, 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 1 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 обеспечивается 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 обеспечивается конструкцией изделий.

При наличии требований по прочности и (или) устойчивости к воздействию широкополосной случайной вибрации изделия, имеющие 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 обеспечивается 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 периодически 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 обеспечивается 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 $\cdot$ 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 и 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 выводов), 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 обеспечивается 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 издели-

ям с минимальными искажениями. При необходимости в стандартах и ТУ на изделия и ПИ следует приводить чертежи монтажных плат и крепежных приспособлений, применяемых 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 на существующем оборудовании, то проводят испытания каждого отдельного блока. Если последовательность испытания блоков не позволяют 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 ЭА, условий эксплуатации, типа производства. Например, в программу определительных испытаний опытного образца и образцов установочной серии обычно включают все ви-

ды механических испытаний, а для образцов, изготовляемых в серийном производстве — только испытания, предусмотренные в стандартах и ТУ на ЭА.

Надежная работа ЭА обеспечивается за счет конструктивных запасов по вибропрочности, виброустойчивости, резонансной частоте и другим характеристикам. Конструктивный запас ЭА по резонансной частоте оценивается коэффициентом конструктивного запаса

$$K_з = f_{0н} / f_в,$$

где $f_{0н}$ — 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 Государственных стандартах.

Испытание ЭА на климатические воздействия

Испытание ЭА (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 ЭА 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 равнове-

сия 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 ЭА 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 контроля 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. 11.6, если в НТД не указаны иные допускаемые отклонения, обусловленные спецификой эксплуатации изделий.

Внешний осмотр изделий осуществляют в соответствии с НТД.

Таблица 11.6. **Допустимое отклонение воздействующих климатических факторов**

Воздействующий фактор	Допустимое отклонение
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 1,33Па	±30 %
Повышенное избыточное давление по ТУ, Па	±20 %
Солнечное излучение:	
Интегральная плотность потока по ТУ, Вт · $м^{-2}$	±10 %
Плотность потока ультрафиолетовой части спектра по ТУ, Вт · $м^{-2}$	±25 %

Окончание табл. 11.6

Воздействующий фактор	Допустимое отклонение, %
Интенсивность дождя, кг · м$^{-2}$	±40
Массовая концентрация пыли по ТУ, г · л$^{-1}$	±25
Скорость ветра по ТУ, м · с$^{-1}$	±10
Массовая концентрация (массовая доля) коррозионно-активных агентов среды по ТУ, г · л$^{-1}$	±10

Примечание. * Допустимое отклонение в Паскалях берется в том случае, если оно больше допустимого отклонения в процентах.

Климатические испытания проводят не только на стадии проектирования ЭА, но и в серийном производстве для отбраковки потенциально ненадежных изделий (приемосдаточные испытания) и для контроля стабильности производства (периодические испытания). Режимы и условия испытания ЭА устанавливают в зависимости от степени жесткости, которая, в свою очередь, определяется условиями дальнейшей эксплуатации ЭА 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 в последовательности, при которой 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 суток, 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.

Контрольные вопросы

1. Какие методы применяют при регулировке ЭА?
2. Назовите этапы регулировки ЭА.
3. Перечислите методы настройки ЭА.

4. Назовите виды контроля ЭА.
5. Перечислите диагностические программы.
6. Какие основные признаки дефектов ЭА?
7. Назовите способы поиска неисправностей ПЭВМ.
8. Какая последовательность диагностирования и ремонта клавиатуры ПЭВМ?
9. Перечислите испытания в зависимости от их назначения. Каковы цели этих испытаний?
10. Каковы основные разделы программы испытаний и их характеристики?
11. Перечислите виды механических испытаний.
12. Перечислите виды климатических испытаний.

12. ЭРГОДИЗАЙН ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Широкое внедрение ЭА во все сферы деятельности и компьютеризация общества требуют от разработчиков ЭА учета при проектировании *человеческого фактора* — особенностей органов чувств, опорно-двигательного аппарата и нервной системы человека. Изучением влияния особенностей человека на конструктивные параметры различных изделий, в том числе на ЭА, занимается *эргономика*.

Возникновение эргономики и ее развитие тесно связаны с дизайном. Именно дизайн с его гуманитарной направленностью явился главным потребителем и заказчиком знаний о функциональных возможностях человека с тем, чтобы в проектируемых объектах были обеспечены эффективность и безопасность труда, сохранение здоровья и высокая работоспособность.

Рассматривая вопросы создания наилучших функциональных условий деятельности человека, необходимо объединять требования, определяемые эргономикой и дизайном, в единое понятие — *эргодизайн*. В основе эргодизайна как научного направления лежит известный *закон соответствия*, а его методы базируются на *методологии функционального комфорта* [18, 31].

Современная трактовка основных понятий и определений в области эргономики и дизайна приведена в табл. 12.1 [25, 31].

Таблица 12.1. **Основные понятия и определения эргодизайна**

Понятие	Определение
Эргономика	(Греч. *ergon* — работа и *nomos* — закон) — наука, изучающая особенности деятельности человека (или группы людей) в условиях производства и жизнедеятельности с целью оптимизации орудий, условий и процесса труда
Дизайн	Проектная художественно-техническая деятельность по формированию гармоничной предметной среды во всех сферах жизнедеятельности человека. Цель проектирования в дизайне — оптимизация функциональных процессов жизнедеятельности человека, повышение эстетического уровня изделий. Основными категориями дизайнерского проектирования являются: образ, функция, форма, эстетическая ценность

Окончание табл. 12.1

Понятие	Определение
Комфорт	Совокупность положительных психофизиологических ощущений человека в процессе его контактов с внешними объектами или средой
Предметная среда	Совокупность окружающих человека изделий и их комплексов, используемых им для организации функциональных процессов жизнедеятельности и удовлетворения материальных и духовных потребностей
Предметно-пространственная среда	Непосредственное окружение, совокупность природных и искусственных пространств и их предметное наполнение, находящиеся в постоянном взаимодействии с человеком в процессе его деятельности. Предметно-пространственная среда и ее элементы — важнейшие объекты дизайна
Эстетическая ценность	Особое значение объекта, возникающее в процессе контакта с ним человека в ситуации эстетического восприятия и переживания. Создание эстетической ценности среды является специфической задачей дизайна
Закон соответствия	Средства деятельности должны быть адекватны возможностям человека, осуществляющего эту деятельность
Функциональный комфорт	Совокупность принципов, образующих методологию эргодизайна, базовыми из которых являются: • оптимальное психофизиологическое состояние человека в процессе активной деятельности, проявляющееся в виде положительных эмоциональных реакций и удовлетворенности; • эргономический критерий адекватности предметного окружения индивидуальным возможностям и потребностям человека
Эргатическая система	Сложная система управления, в состав которой входит человек-оператор (или группа операторов), например, система управления космическим кораблем, диспетчерская служба аэропорта, вокзала, морского порта и др.
Эргодизайн	Научно-техническое направление, предметом изучения которого является деятельность, направленная на формирование у проектируемого объекта таких свойств, которые обеспечивают при взаимодействии с ним человека функциональный комфорт и придают ему бóльшую эстетическую ценность. Объектами эргодизайна являются процесс и средства деятельности (внешние и внутренние), а также условия ее протекания (санитарно-гигиенические, социокультурные, психологические и т. п.)

Цель эргодизайна ЭА — создание высокоэффективных человеко-машинных систем. У таких систем должен быть комплекс эргодизайнерских показателей конструкции, которые можно разделить на три класса: гигиенические, антропометрические и физиолого-психологические, которые в свою очередь делятся на группы (табл. 12.2) [10, 25].

Таблица 12.2. **Эргодизайнерские показатели**

Гигиенические	Антропометрические	Физиолого-психологические
Освещенность	Компоновка	Статические и
Тепловой баланс	Досягаемость рабочих органов	динамические
Уровень шумов и вибраций	Конструкционные характеристики (размеры, форма)	нагрузки (скоростные и силовые)
Уровень электромагнитных полей	Соотношение объема и пространства	Зрительные
Уровень ионизации	Пропорциональность и симметричность конструкции	Слуховые
Токсичность		Одорантные
Климатический комфорт	Композиционно-гармонические (стиль дизайна)	Эмоциональные
		Тактильные
		Информационные

Требования, предъявляемые к человеко-машинным системам (применительно к ЭА следует иметь в виду также человеко-приборные или человеко-аппаратные системы), регламентируются нормативными документами — законами (Закон Российской Федерации «О сертификации продукции и услуг» и др.), Государственными и отраслевыми стандартами, санитарными нормами и правилами. Так, в СанПиН 2.2.2.542—96 «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» изложены базовые требования, которые должен учитывать проектировщик при разработке современных вычислительных систем. В данном документе выделены следующие группы требований:

- общие требования к вычислительным системам;
- требования к помещениям для эксплуатации вычислительных систем;
- требования к микроклимату;
- требования к шуму и вибрации;
- требования к освещенности помещений и рабочих мест;
- требования к организации и оборудованию рабочих мест;
- требования к организации режима труда;
- требования к организации медицинского обслуживания.

Знание и учет указанных показателей и требований крайне необходимы уже на ранних стадиях проектирования ЭА, будь то персональный ком-

пьютер или распределенная вычислительная система. Прежде чем перейти к рассмотрению методов и средств обеспечения высоких эргодизайнерских характеристик проектируемых систем, проанализируем основные характеристики человека-оператора как звена в единой системе человек—машина.

12.1. Характеристика человека-оператора как звена в единой системе человек—машина

Инженеру-конструктору-технологу ЭА в процессе работы приходится решать ряд задач, связанных как с разработкой конструкции самой ЭА, так и разработкой технологических приспособлений, инструмента и технологической оснастки, используемой при ее производстве, испытаниях и контроле. Учитывая свойства проектируемых электронных систем и технологического оборудования, можно выделить две группы систем: *человек—инструмент* и *человек—машина* [10, 25]. При работе с простыми орудиями труда весь поток информации, необходимый для управления воздействием на предмет труда, преобразует человек. При этом он полностью осуществляет и контролирует процесс воздействия. Машина является преобразователем информации, а не только энергии, т. е. она частично без участия человека формирует командные сигналы и регулирует воздействие. В результате принципиальная особенность работы человека с машиной (прибором, аппаратом) заключается в неполном контроле с его стороны за протекающим процессом воздействия на предмет труда. В табл. 12.3 приведена классификация систем «человек—инструмент», а в табл. 12.4 — систем «человек—машина» [10, 25].

Исходя из данной классификации, можно заключить, что одним из основных направлений эргономического исследования является анализ психофизиологической сущности функциональной деятельности человека-оператора. Наиболее характерной чертой деятельности оператора является то, что он лишен возможности непосредственно наблюдать за управляемыми объектами и вынужден пользоваться информацией, которая поступает к нему по каналам связи.

Восприятие информации человеком-оператором осуществляется органами чувств, являющихся для него «входом». «Выходом» для человека-оператора служат органы речи и двигательные реакции, которые также несут в себе определенное количество информации. Учитывая это, человек-оператор может быть представлен в виде сложной системы, предназначенной для приема, переработки и выдачи информации и охваченной обратными связями (рис. 12.1) [25].

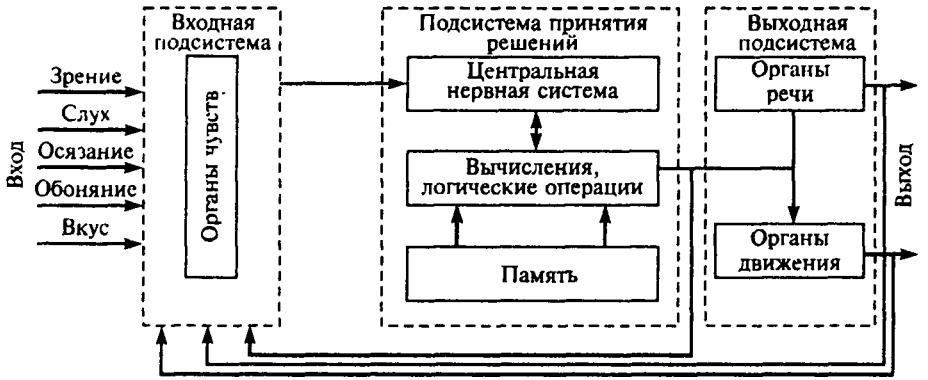


Рис. 12.1. Функциональная схема человека-оператора в управляющей системе

Таблица 12.3. **Классификация систем типа «человек—инструмент»**

Система	Описание
С эффективными орудиями (инструментами)	Психофизиологическая особенность этого класса заключается в изменении характера воздействия на предмет труда по сравнению с естественными двигательными реакциями человека
С афферентными орудиями	С помощью таких орудий естественный образ предмета труда превращается в измененный образ, который можно рассматривать как простейшую информационную модель предмета, характеризующуюся изменением масштаба, ракурса, отдельных признаков и появлением новых (например, при работе с микроскопом). В результате человек должен в процессе обучения выработать специальный (отличный от жизненного опыта) набор энграмм — эталонов, необходимых для восприятия
С орудиями памяти (например, чертеж, фотография и т. п.)	В этом случае используется искусственный код. Перекодирование как специфический психический процесс становится важным компонентом деятельности человека
С орудиями преобразования информации (счеты, логарифмическая линейка и т. д.)	В результате использования таких орудий происходит изменение психологической структуры принятия решений. Ряд операций продуктивного мышления человек может превратить в простые операции прямого замыкания, высвобождая тем самым мозг для творческого мышления

Таблица 12.4. **Классификация систем типа человек—машина**

Система	Описание
С простой машиной	Преобразование информации совершается по элементарной линейной программе (передача от человека части реакций прямого замыкания). Обратная информация от предмета труда поступает почти полностью к человеку, и он сам вносит коррективы в программу машины
С репродуктивно-преобразующей машиной (обычные ЭВМ)	Характерным является существенное, почти полное отчуждение человека от предмета труда и его преобразования. Если человеку понадобится включиться в рабочий процесс, он должен будет реконструировать как состояние предмета труда, так и процессы, которыми управляет машина
С продуктивно-преобразующей машиной (самоорганизующиеся системы, суперЭВМ, нейрокомпьютеры и т. п.)	Взаимодействие человека с такой машиной уже носит характер информационного обмена между относительно замкнутыми системами информации

Каждый из блоков системы человек—машина характеризуется двумя важнейшими параметрами: временем реакции τ_i и вероятностью получения правильного результата P. Правомерность принятия конкретного значения P_i для каждого из блоков связана с тем, что, во-первых, информация, получаемая человеком, не всегда может быть исчерпывающей, во-вторых, она по-разному воспринимается людьми, в-третьих, целенаправленные действия человека не всегда выполняются безошибочно и, в-четвертых, часто человеку-оператору приходится иметь дело не с реальными объектами, а с их моделями.

Объем информации, перерабатываемой и хранящейся в модели, и правила ее организации должны соответствовать задачам и способам управления. Наиболее существенной особенностью деятельности человека с информационной моделью является необходимость определения степени соответствия сведений, получаемых с помощью приборов, экранов, табло как между собой, так и с реальными управляемыми объектами. Именно на основании этого анализа строится вся деятельность человека-оператора.

Приведенное описание деятельности человека-оператора позволяет сформулировать основные требования к обеспечению деятельности человека-оператора на каждом из этапов, но для проектирования системы важным является и количественная оценка тех или иных характеристик каждого из этапов.

Количественная оценка этапов функциональной деятельности человека-оператора

Для получения количественных оценок функциональной деятельности человека-оператора используют группы методов эргодизайнерского проектирования и исследований, которые можно разделить на аналитические и проектировочные. *Аналитические методы* направлены на выявление структуры деятельности, ее особенностей. *Проектировочные методы* направлены на разработку мероприятий, обеспечивающих выполнение требований «функционального комфорта». В свою очередь, аналитические методы делятся на эмпирические и экспериментальные. Экспериментальные методы предполагают активное воздействие на реальную деятельность.

Среди эмпирических методов исследования выделяют:

- анализ результатов деятельности и документации;
- непосредственное наблюдение;
- опосредованное наблюдение (в результате невозможности прямого наблюдения или необходимости регистрации наблюдений на кино-, фото-, аудио-, видео- и других носителях);
- самонаблюдение (исследование функциональной деятельности на основе собственного опыта);
- хронометраж;
- опросные методы (чаще всего психофизиологические).

Среди экспериментальных методов выделяют исследования:

- на основе факторных моделей;
- на основе регрессионных моделей;
- на моделях, базирующихся на основе теории Хаоса.

Все эти методы направлены на получение количественных оценок функциональной деятельности человека-оператора.

Сумма реакции человека-оператора складывается из времен реакции на каждом из этапов функциональной деятельности человека-оператора. Общее время *сенсомоторной реакции* — это время, затраченное на выполнение определенного вида реакции (движения или голосовой реакции) в ответ на внезапно появляющийся сигнал с максимально возможной для человека скоростью. Для упрощения расчетов принято, что время задержки в этом случае складывается из латентного периода реакции — времени от момента появления сигнала до начала ответного действия (табл. 12.5) и длительности моторного действия — времени ответного действия (табл. 12.6) [31—33].

Таблица 12.5. **Сравнительные характеристики анализаторов человека-оператора**

Анализатор	Латентный период, с
Тактильный (прикосновение)	0,09...0,22
Болевой (укол)	0,03...0,2
Слуховой (звук)	0,12...0,18
Зрительный (свет)	0,15...0,22
Обонятельный (запах)	0,31...0,39
Температурный (тепло-холод)	0,28...1,6
Вестибулярный аппарат (вращение)	0,4...0,8
Вкусовой:	
горький	1,08
сладкий	0,45
кислый	0,54
соленый	0,31

Таблица 12.6. **Характеристики времени и безошибочности действий человеком**

Наименование действия	Математическое ожидание, с	Среднее квадратичное отклонение, $с^2$	Вероятность
Обнаружение и декодирование сигнала	1,63	0,70	0,9700...0,9999
Поиск и декодирование заданного сигнала	4,10	1,52	—
Поиск органов управления и осуществление заданного управляющего воздействия	5,50	2,04	0,9610...0,9850
Обнаружение сигнала и принятие решения	8,40	3,30	0,9380...0,9780
Выполнение управляющего воздействия, состоящего из нескольких действий	3,50	2,32	—
Прием информации и ее оценка:			
число воспринимаемых признаков 3—5, задержка во времени появления 10...12 с	26,40	11,50	0,8750...0,9950
число воспринимаемых признаков 5—6, задержка во времени появления 15...40 с	81,0	24,0	0,4470...0,7830
число воспринимаемых признаков 1—2, задержка во времени появления 10...12 с	20,50	8,76	0,8550...1,0000

Окончание табл. 12.6

Наименование действия	Математическое ожидание, с	Среднее квадратичное отклонение, $с^2$	Вероятность
Считывание показаний стрелочного прибора:			
одношкального	1,5	0,6	0,9900...0,9960
двушкального	2,5	0,8	0,9850...0,9900
Проверка логического условия типа ИЛИ	0,3	0,1	0,9960
Нажатие кнопки	0,2	0,003	0,9985...0,9999
Считывание информации с табло	0,3	0,002	0,9950...0,9995
Включение тумблера	0,2	0,1	0,9990...0,9995
Простые реакции по преобразованию информации (прямое, кратковременное и оперативное запоминание)	1,5	0,6	0,9995
Выдача и прием речевой команды	4,0	2,0	0,9998
Поворот переключателя	0,7	0,1	0,9975...0,9990
Снятие показания с прибора:			
с круговой шкалой	1,25	0,22	0,9952...0,9999
электросчетчика	1,80	0,40	0,9985...0,9995
шильдика	1,30	0,32	0,9985...0,9999
с линейной шкалой	1,25	0,22	0,9975...0,9980
с полукруглой шкалой	1,25	0,25	0,9933...0,9975
Выполнение действия с помощью:			
штурвала	1,3	0,3	0,9965...0,9980
ручки управления	1,7	0,4	0,9936...0,9995
маховика	3,0	1,2	0,9994...0,9999
съемного рычага (ключа)	4,2	2,5	0,9920...0,9990
Выполнение действий по:			
соединению кабеля	5,4	2,7	0,9986...0,9998
рассоединению кабеля	3,2	1,1	0,9995...0,9999
установке штифта	2,4	0,7	0,9989...0,9998
открытию вентиля	2,2	0,9	0,9980...0,9995
подсоединению шланга	3,5	1,3	0,9955...0,9970
установке уплотнения	2,3	0,9	0,9910...0,9945
установке штекера	1,9	0,6	0,9970...0,9985
Выполнение пункта инструкций	—	—	0,9915...0,9955
Перемещение человека по:			
монтажной площадке	—	—	0,9990...0,9995
временному настилу	—	—	0,9940...0,9975
Использование средств защиты:			
страховочного пояса	5,4	—	0,9940...0,9980
переносного заземления	—	—	0,8500...0,8900
съемных ограждений	—	—	0,7500...0,8500

Взаимодействие человека-оператора с управляющей системой осуществляется поэтапно (см. рис. 12.1).

На первом этапе (восприятие информации) человек-оператор доступными ему анализаторами (см. табл. 12.5) проводит обнаружение объекта восприятия, выделение в объекте отдельных признаков, ознакомление с выделенными признаками и распознавание объекта восприятия. Важным параметром, характеризующим способность человека-оператора воспринимать поступающую информацию, является возможная скорость переработки информации (бит/с). Максимальная пропускная способность человека по восприятию информации не превышает 40 бит/с, а номинальная пропускная способность составляет 2...6 бит/с (для сравнения, средняя пропускная способность телевизионного канала $3 \cdot 10^4$ бит/с, а сетевого, например ATM, несколько Гбит) [25].

Пропускная способность человека-оператора связана с темпом (скоростью) поступления информации от вычислительной системы. Низкий темп поступления информации проявляется в падении активности человека-оператора. Высокий темп, наоборот, приводит к резкому росту ошибок и отказу человека-оператора от выполнения задачи. Пропускная способность человека-оператора зависит также от условий работы и от того, насколько полно они соответствуют психофизиологическим и антропометрическим характеристикам.

На втором этапе (оценка информации и принятие решений) время анализа и принятия решений складывается из целого ряда субъективных характеристик, таких как: личностные характеристики умственных возможностей человека-оператора, параметры памяти, его опыт и навыки, которые трудно поддаются количественным оценкам (табл. 12.7).

На третьем этапе (реакция на информацию) определяющей составляющей во времени реакции является длительность моторного действия, которая труднее, чем латентный период поддается измерению, так как зависит от многих случайных факторов (места нахождения человека-оператора в момент приема информации, его позы, степени усталости и т. п., формы пульта управления, расположения органов управления, уровня образования и опыта работы человека-оператора и т. д.). Большинство данных параметров носит субъективный характер. Их трудно оценить численно, поэтому длительность моторного действия определяется статистически на моделях или макетах тех или иных устройств с участием человека. Средние силовые показатели групп мышц человека-оператора представлены в табл. 12.8. Время выполнения типовых операций строго регламентировано и определяется соответствующими стандартами, данные в которых устанавливаются путем экспериментальных измерений с дальнейшей статистической обработкой и усреднением (см. табл. 12.8) [20, 25].

Таблица 12.7. **Характеристики умственной деятельности человека**

<table>
<tr><td>Долговременная память (LONG-TERM MEMORY — LTM):</td><td colspan="5">Рабочая память (WORKING MEMORY — WM)</td></tr>
<tr><td rowspan="3">δ_{LTM} = X,
μ_{LTM} = X,
K_{LTM} = семантический</td><td colspan="5">μ_{WM} = 7 (5—9) цепочек,
δ_{WM} = 7 (5…226) с
δ_{WM} (1 цепочка) = 7 (5…34) с
K_{WM} = Акустическая или визуальная</td></tr>
<tr><td>Обработка визуальной информации — Visual Image Store (VIS)</td><td>Обработка звуковой информации — Auditory Image Story (AIS)</td><td>Нейрообработка</td><td>Познавательная обработка (приобретение знаний)</td><td>Моторная реакция</td></tr>
<tr><td>δ_{VIS} = 200 (70… 1000) мс,
μ_{VIS} = 17 (7…17) знаков,
K_{VIS} = физический</td><td>δ_{AIS} = 1500 (900… 3500) мс
μ_{AIS} = 5 (4,4…6,2) знаков,
K_{AIS} = физический</td><td>τ_P = 100 (50…200) мс</td><td>τ_P = 70 (25…170) мс</td><td>τ_P = 100 (30…100) мс</td></tr>
</table>

Примечание. δ — время стирания информации; X — индивидуальный показатель; μ — емкость памяти; K — характер исполнительного органа.

При разговоре люди ожидают ответа (даже если это кивок или невнятное бормотание) около 2 с, и того же они ждут при работе с компьютером. Например, очень показателен пример с организацией дистанционного обучения посредством электронной почты: если в течение дня слушатель, отправивший свой вопрос преподавателю, не получает ответа, то он практически теряет интерес к данной проблеме.

Так как на представления пользователя оказывает сильное влияние его предшествующий опыт работы с технической системой, важным является преемственный и предсказуемый отклик системы. Пользователи могут обнаружить малые изменения во времени ответа, хотя обычно малые отклонения их не беспокоят. Если при работе с системой, которая обычно дает ответ в течение 2 с, ответ задерживается до 10 с, некоторые пользователи начинают нажимать клавиши, чтобы проверить, не вышла ли система из строя.

Таблица 12.8. **Средние силовые показатели групп мышц человека-оператора**

Группа мышц	Мужчины, Н	Женщины, Н
Мышцы правой кисти руки	380	220
Мышцы левой кисти руки	360	200
Мышцы большого пальца правой руки	120	90
Мышцы большого пальца левой руки	100	80
Средние скоростные возможности рук		
Вид движения	Максимальная частота поворота правой руки, $с^{-1}$	Максимальная частота поворота левой руки, $с^{-1}$
Вращательное	4,8	4,0
Нажимное	6,7	5,3
Средние скоростные возможности отдельных звеньев конечностей		
Движущееся звено	Минимальная средняя частота движения, $мин^{-1}$	Максимальная средняя частота движения, $мин^{-1}$
Палец	204	406
Кисть	360	431
Плечо	99	344
Стопа	300	378

Согласно известному правилу, человек может одновременно запомнить сведения о 7 j 2 предметах. Поэтому, например, номер телефона разбивают на группы цифр, чтобы набирать его можно было удобными порциями информации. Считается также, что хранение данных в памяти ограничено во времени: в среднем мы можем хранить речевую информацию длительностью 2 с. Люди имеют склонность разбивать свою деятельность на этапы, соответствующие порциям информации. Мозг делает метаморфический вздох облегчения при достижении паузы, величина которой свидетельствует о значительности паузы. Последняя группа цифр номера телефона воспринимается, например, с большим вздохом облегчения, чем любая из предыдущих групп. Задержки, предшествующие завершению этапа, очень вредны и неприятны, так как содержимое временной памяти требует постоянного обновления и легко стирается под влиянием внешних факторов. Большинство людей спокойно воспринимают задержку в несколько секунд между последней набранной цифрой номера телефона и моментом соединения с абонентом. Но задержка после нажатия каждой клавиши цифрового телефона будет восприниматься неестественно.

Диалог с вычислительной системой накладывает сходные требования, которые во многом определяются уровнем нервно-психологической нагрузки на человека-оператора (табл. 12.9).

Таблица 12.9. **Характеристики нервно-психологической нагрузки человека**

Характеристики нервно-психологической нагрузки человека-оператора по вниманию			
Интенсивность нагрузки	Количество одновременно наблюдаемых объектов, шт.	Время сосредоточенного наблюдения относительно продолжительности смены, %	Частота сигналов, $ч^{-1}$
Легкая	До 5	До 25	До 75
Средняя	5...10	25...50	75...175
Тяжелая	10...25	50...75	175...300
Очень тяжелая	Более 25	Более 75	Более 300
Характеристики нервно-психологической нагрузки человека-оператора по анализаторным функциям			
Интенсивность нагрузки	Размеры объекта наблюдения, мм (учитывается и при установке разрешения на мониторе)	Время пассивного наблюдения относительно продолжительности смены, %	Отношение звукового сигнала и шума, дБ
Легкая	До 1	До 75	18...15
Средняя	1...0,3	75...90	15...6
Тяжелая	0,3...0,15	90...95	6...0
Очень тяжелая	Менее 0,15	Более 95	0...5

Если время ответа значительно превышает 2 с, функции, которые человек хочет или может выполнить, изменяются. Человек должен изменить свой ритм работы, как вам пришлось бы изменить привычку набирать телефонный номер, если бы была необходима задержка между набираемыми цифрами.

Многие ранние работы, посвященные времени ответа, были выполнены Р.Б. Миллером (AFIPS, 1985 г., Труды национальной компьютерной конференции), который пришел к следующему заключению: «Нельзя указать четкой границы, когда увеличение времени ответа снижает эффективность работы, скорее имеют место случайные спады в умственной деятельности, если задержки превышают заданное значение. Эти случайные спады

в определенные моменты можно рассматривать как прерывания, снижающие психологическую деятельность».

Физиологические характеристики человека-оператора

Физиологические показатели человека являются отправной точкой для обеспечения согласования его возможностей с требованиями, определенными машинной составляющей системы и средой обитания. Согласно требованиям эргодизайна конкретное рабочее место должно быть максимально адаптировано для работника с конкретной квалификацией, учитывая его антропометрические, физиолого-психологические особенности и общие гигиенические показатели.

Гигиенические показатели регламентируют уровень комфортности среды обитания. Между комфортными и некомфортными условиями труда существует психологическая граница, а между некомфортными и невыносимыми (опасными) — физиологическая (табл. 12.10). Допустимые значения гигиенических параметров приведены в системе стандартов по Безопасности труда и СанПиН.

Таблица 12.10. **Гигиенические параметры среды**

Наименование параметра	Комфортные условия	Некомфортные условия	Невыносимые условия
Температура, С°			
тепло	+22...+24	+35...+44	выше + 44
холод	+18...+22	–1	ниже –1
Воздухообмен, $м^3$/(ч·чел)	34...22	8,5	менее 8,5
Шум, дБ	40...90	120	130—135
Амплитуда вибраций, мм	0...0,2	1,3	Более 1,3
Линейное ускорение, g	0...0,1	1	Более 1
Влажность, %	20...60	10	Менее 10
Концентрация CO_2, %	0...0,03	—	более 0,03
Наклон тела, град	0...+/– 5°	+/–20°	более +/– 20°
Плотность потока мощности СВЧ, $Вт/см^2$	0...0,001	0,001...0,01	более 0,01
Высота над уровнем моря, м	0...3000	3000...6000	более 6000
Количество выделяемой кожей влаги, г/ч	30...450	Более 450	—

Рассмотрим физиолого-психологические характеристики человека-оператора: зрительные, слуховые, скоростные, силовые, тактильные и информационные.

Зрительное восприятие обеспечивает возможность воспринимать форму, цвет, яркость и движение. Установлено, что 80 % информации человек получает с помощью органов зрения. Глаз среднего человека способен воспринимать электромагнитные излучения длиной волны 380...780 нм. Способность человека воспринимать информацию зрением характеризуется чувствительностью, полем зрения обоих глаз, остротой зрения, аккомодацией, адаптацией, конвергенцией, цветовым восприятием, стробоскопичностью и стереоскопичностью.

Чувствительность глаза зависит от уровня освещенности и яркости, диапазон оценки которой лежит в пределах от 10^{-4} до 10^{8} кд/м^2. Оптимальная яркость фона, обеспечивающая наибольшую разрешающую способность зрения, составляет 10^{4} кд/м^2.

Поля зрения обоих глаз при неподвижном положении головы представлены на рис. 12.2 и табл. 12.11. Увеличение углов обзора происходит при поворотах и наклонах головы и туловища. Концентрация внимания сужает угол эффективной видимости порядка на 30° в горизонтальной и вертикальной плоскостях [25].

Таблица 12.11. **Количественные характеристики доступного зрительного пространства (рис. 12.2)**

Параметр	Значения для положения стоя, град	Значения для положения сидя, град
α — расположение головы	0...15	25
β — расположение взгляда	15...30	40
γ — вертикальное поле взгляда	105	105
δ — вертикальная точка зрения	30	30
ε — горизонтальное поле взгляда	120	120
ξ — горизонтальная точка зрения	70	70
d — расстояние при свободной работе	35 (см)	35 (см)

Острота зрения, или разрешающая способность — свойство глаза обнаруживать малые объекты и различать тонкие детали. Это свойство сильно меняется в зависимости от вида объекта, спектрального состава распределения энергии светового излучения, освещенности фона, контраста между объектом и фоном, продолжительности действия зрительных стимулов и других факторов. Для движущихся объектов острота зрения зависит от скорости их движения. Остроту зрения выражают в единицах, обратных углу зрения. Порог восприятия минимальных движений в угловых единицах составляет: на свету при наличии неподвижных объектов — 0'21" в 1 с, в темноте без неподвижных предметов — 1'15"...1'55" в 1 с.

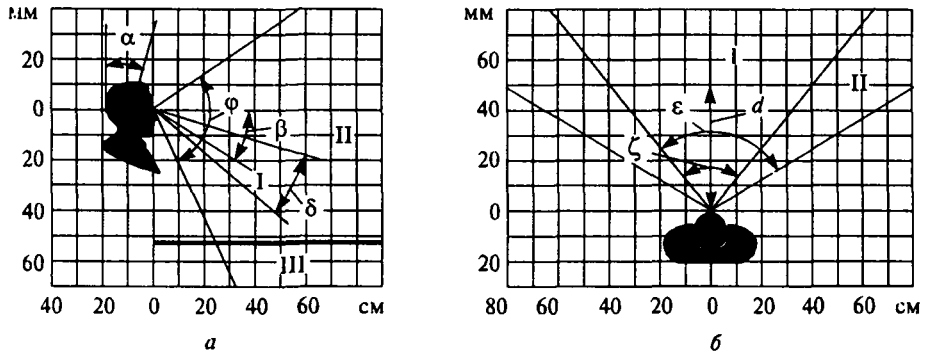


Рис. 12.2. Поля зрения глаз человека-оператора:

а — в вертикальной плоскости, *б* — в горизонтальной плоскости; I — благоприятная область видимости; II — допустимая область видимости; III — допустимая область видимости при отсутствии стола

Аккомодация — процесс фокусировки хрусталика глаза на близкие или далекие предметы. С возрастом хрусталик глаза теряет свою эластичность. Объекты, расположенные на расстоянии 6 м и далее от наблюдателя, находятся для глаза в оптической бесконечности и фокусировка на эти объекты не требует аккомодации.

Адаптация — изменение чувствительности глаза в зависимости от воздействия на него раздражителей. Приспособление глаза к темноте называют темновой адаптацией. При переходе из светлого помещения в темное для адаптации глаза к темноте требуется приблизительно 20 мин.

Конвергенция — нацеливание глаз на одну точку с помощью совместного действия глазных мышц и хрусталика. Среднее время, необходимое для нацеливания глаз и фокусировки на новую точку, смещенную на некоторое расстояние, составляет около 165 мс. При чтении с печатного листа это время составляет 20 мс, а при чтении с экрана монитора около 40 мс.

Цветовое восприятие глаза заключается в его способности различать цвета по цветовому тону, насыщенности и контрастности с фоном. Нормальное цветовое зрение называют *трихроматическим* (трехцветным), так как любой из 160 различаемых человеком цветовых тонов можно получить в виде смеси трех базовых цветов: красного, зеленого, синего (RGB-палитра, вспомните, что современные мониторы воспроизводят 16, 256, 16К, 24К и 32К цветов).

На зрительную способность большое влияние оказывает *контраст* — разность яркостей объекта и фона. Существует цветовой и яркостный контраст. Различают контраст прямой (объект темнее фона) и обратный (объект ярче фона). Численно контрастность можно оценить по формуле

$$K = [|B_ф - B_o| / B_ф]100\ \%\ \ \text{при}\ \ B_ф > B_o,$$

где $B_ф$, B_o — соответственно яркости фона и объекта.

Рекомендуемый диапазон контраста составляет 65...100 %. Оптимальный контраст составляет 85...95 % для диффузных поверхностей, равномерно отражающих падающий световой поток (в отличие от зеркальных поверхностей). Яркость и освещенность связаны следующей зависимостью:

$$B = \rho E/\pi,$$

где B — яркость, кд/м^2; ρ — коэффициент отражения поверхности; E — освещенность, лк.

Стробоскопичность — свойство зрения, обусловленное задержкой в восприятии информации. Критическая частота мельканий (частота кадров), которую еще способен различать глаз, зависит от яркости. Важным для глаза является также соотношение между светлой и темной фазами. Если информация поступает чаще, чем ее порции становятся различимыми, то отдельные ее фрагменты могут не восприниматься. Сильное мерцание изображения утомляет глаза.

Стереоскопичность — свойство зрения, обусловленное возможностью восприятия двух различных изображений, которое в свою очередь определено только одним световым раздражением. Стереоскопичность имеет «порог глубины», который соответствует бинокулярному параллаксу 5 угл. с. Данные параметры важно учитывать при разработке электронных 3D-систем «виртуальной реальности».

Наиболее ярким примером учета физиологических особенностей зрительного восприятия являются форматы представления графической информации в Интернет/Интранет сетях, 95 % которых приходится на форматы GIF и JPEG.

Формат GIF (Graphics Interchange Format) был предложен в 1987 г. для передачи растровых изображений. Наиболее распространена модификация GIF89a, принятая в 1989 г. В формате GIF используется цветовая палитра RGB. Главными преимуществами формата является высокая компрессия без потери качества контрастных изображений при небольшом количестве цветов, поддержка прозрачности фона и анимации.

Формат JPEG был предложен в 1990 г. группой Joint Photographic Experts Group. JPEG использует свое собственное цветовое пространство YCbCr, которое может быть приведено к 8-битной RGB палитре путем следующих преобразований:

$$Y = 0{,}299R + 0{,}587G + 0{,}114B;$$
$$Cb = -0{,}1687R - 0{,}3313G + 0{,}5B + 128;$$
$$Cr = 0{,}5R - 0{,}4187G - 0{,}0813B + 128.$$

Формат JPEG максимально учитывает особенности восприятия цвета глазом. Визуальными сенсорами человеческого глаза являются колбочки и палочки (расположенные на сетчатке). Y определяет яркость изображения, фактически это черно-белый вариант изображения (оттенки серого) — за восприятие этого компонента отвечают палочки; за цветовое восприятие — Cb- и Cr-колбочки. Наибольшее значение в рассматриваемом формате придается зеленой составляющей, так как человеческий глаз наиболее чувствителен к зеленому цвету, далее идут красная и синяя. Cr- и Cb-колбочки носят название — цветоразрядность, они показывают количество красной и синей компонентов в конкретном цвете.

Слуховое восприятие обеспечивает человеку-оператору прием звуковых колебаний от источника звука. Слух человека способен воспринимать звуковые колебания в частотном диапазоне от 16 до 20 000 Гц. Звуки с частотами ниже 16 Гц относятся к *инфразвуку*, а с частотами выше 20 000 Гц к *ультразвуку*.

Степень восприятия звука ухом человека зависит от частоты, энергетической характеристики звукового поля и состояния слухового аппарата человека в данный момент времени. Громкость — субъективный аналог интенсивности звука, оцениваемой в единицах звуковой энергии (Вт/см^2) или в относительных единицах — децибелах (дБ).

В табл. 12.12 представлена усредненная оценка действия звука различной интенсивности на человека на частоте 1000 Гц.

Таблица 12.12. **Усредненная оценка действия шума на человека-оператора**

Субъективная оценка	Уровень звука, дБ	Сила звука, Вт/м^2
Порог слышимости	0	10^{-12}
Шум заметен	40	10^{-8}
Шум беспокоит	50	10^{-7}
Шум мешает	70	10^{-5}
Разговор не возможен	90	10^{-3}
Шум подавляет и раздражает	120	10^{0}
Болевой порог	130	10^{2}

Как правило, источником звуковой энергии являются поверхности конструкций, совершающие колебания, которые и создают акустическое поле шумящего объекта. Образующееся акустическое поле характеризуется звуковым давлением P (Па) и колебательной скоростью v (м/с), возникающими в точке воздушной среды при прохождении через нее звуковой волны. Энергетическими характеристиками акустического поля является интенсивность I (Вт/м^2) (количество энергии упругих волн, проходящих за единицу времени через единицу поверхности в направлении нормали); мощность излучения $N_{изл}$ (Вт) (коли-

чество энергии, проходящей за единицу времени через замкнутую поверхность, огибающую источник звука); плотность энергии звуковых волн W (Вт · с/м^3) (количество энергии, содержащейся в единице объема среды). Важную роль при расчете акустического поля имеет характеристика направленности звукоизлучения источника, т. е. угловое пространственное распределение интенсивности звука. Применяется также оценка уровня шума в дБА, однако при конструкторских расчетах ее используют редко.

Длительное воздействие на человеко-машинные системы акустических шумов различного происхождения отрицательно влияет на общее функциональное состояние как человека-оператора, так и аппаратуры. Последствия такого воздействия шума на человека проявляется в изменениях кровообращения, действии желез внутренней секреции, обмене веществ. В некоторых случаях реакция организма на шум аналогична его реакции в стрессовых ситуациях. Здесь к физической присоединяется психическая сторона восприятия шума. В целом, восприятие шума зависит от характера деятельности, настроения человека в момент восприятия шума, от характера и объема содержащейся в шуме информации. Защита человеко-машинных систем от акустических воздействий в значительной мере определяет гигиенические условия, от которых зависят физическая, психическая и социальная стороны функционального состояния человека-оператора.

Тактильная чувствительность — способность человека воспринимать механические раздражения кожи через нервные окончания, расположенные на ее поверхности. При легком касании к предмету появляется чувство прикосновения, при более сильном — давления, при очень сильном — боли. Кожа ладоней рук и кончиков пальцев относится к числу наиболее восприимчивых к внешним механическим раздражениям участков тела человека. Как и другие органы чувств, тактильная чувствительность зависит от ряда объективных и субъективных факторов. Так, она повышается при нагревании кожи и уменьшается при ее охлаждении. При продолжительной неизменной стимуляции тактильная чувствительность может адаптироваться к определенным раздражителям. В этом случае характерные ощущения не возникают.

Антропометрические характеристики человека-оператора

Среди всего комплекса физиологических характеристик человека-оператора его антропометрические параметры оказывают превалирующее значение при создании эргономичных вычислительных систем. Антропометрические характеристики зависят от многих факторов: пола, национальности, профессии, возраста, личных субъективных факторов и т. п. Антропометрические данные, полученные при обследованиях населения г. Москвы в 1990 г. (мужчин и женщин), приведены в табл. 12.13, а пояснения — на рис. 12.3.

Таблица 12.13. **Сводные антропометрические показатели (рис. 12.3)**

Наименование показателя	Рост мужчин, см			Рост женщин, см		
	163	173	184	151	163	173
1. Дальность действия руки вперед	66,2	72,2	78,7	61,6	69,0	76,2
2. Ширина	23,3	27,6	31,8	23,8	28,5	35,7
3. Дальность действия руки вверх	191,0	205,1	221,0	174,8	187,0	200,0
4. Высота на уровне головы	162,9	173,3	184,1	151,0	161,9	172,5
5. Высота на уровне глаз	150,9	161,3	172,1	140,2	150,2	159,6
6. Высота на уровне плеча	134,9	144,5	154,2	123,4	133,9	143,6
7. Высота на уровне локтя	102,1	109,6	117,9	95,7	103,0	110,0
8. Высота на уровне кисти руки, опущенной вниз	72,8	76,7	82,8	66,4	73,8	80,3
9. Ширина плеч	31,0	34,4	36,8	31,4	35,8	40,5
10. Ширина бедер стоя	36,7	39,8	42,8	32,3	35,5	38,8
11. Высота туловища сидя	84,9	90,7	96,2	80,5	85,7	91,4
12. Высота до уровня глаз сидя	73,9	79,0	84,4	68,0	73,5	78,5
13. Высота на уровне локтя сидя	19,3	23,0	28,0	19,1	23,3	27,8
14. Высота от пола до положения сидя	39,9	44,2	48,0	35,1	39,5	43,3
15. Расстояние от локтя до кисти	32,7	36,2	38,9	29,2	32,2	36,4
16. Расстояние от ноги до спины в положении сидя	45,2	50,0	55,2	42,6	48,4	53,2
17. Расстояние от колена до спины в положении сидя	55,4	59,9	64,5	53,0	58,7	63,1
18. Расстояние от вытянутой ноги до спины в положении сидя	96,4	103,5	112,5	95,5	104,4	112,6
19. Толщина бедра	11,7	13,6	15,7	11,8	14,4	17,3
20. Длина локтевого сустава	39,9	45,1	51,2	37,0	45,6	54,4
21. Длина бедра (сидя)	32,5	36,2	39,1	34,0	38,7	45,1

При проектировании ЭА необходимо также учитывать возможности двигательного аппарата человека. Работая с вычислительными системами, человек большинство операций выполняет руками, поэтому рассмотрим предельные возможности этого двигательного элемента. Руки быстрее движутся по горизонтали, чем по вертикали. Правой рукой удобнее двигать в горизонтальной плоскости против часовой стрелки, левой по часовой стрелке. Прерывистые движения совершаются медленнее, чем непрерывные. Плавность движения рук в горизонтальной и вертикальной плоскостях может быть нарушена вследствие их дрожания. Наименьшее дрожание соответствует углам перемещения 135° и 315°. Время реакции движения руки на какой-либо внешний раздражитель зависит от возраста человека и составляет 0,2...0,3 с.

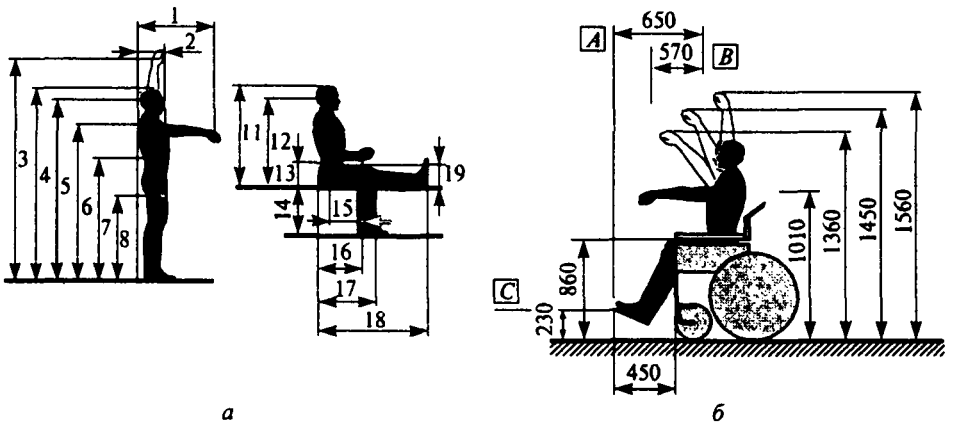


Рис. 12.3. Схемы сводных антропометрических показателей:

а — усредненные показатели человека-оператора; *б* — усредненные показатели для детей 4—12 лет (*А* — 460...550 мм; *В* — 350...460 мм; *С* — 240...380 мм)

Диапазоны движения рук в различных плоскостях ограничены — в плоскости тела — от 0 до +130° (первоначально руки опущены вдоль туловища), перпендикулярно плоскости тела — от –30° до + 170° (первоначально руки опущены вниз, ладони параллельны плоскости тела), в горизонтальной плоскости — от –40 до +140° (первоначально руки вытянуты в стороны на уровне плеч в плоскости тела, ладони повернуты вниз). Кисть в плоскости ладони поворачивается на ±10°, в перпендикулярной плоскости — на –80° (в сторону ладони) и на +40° в противоположную сторону. Диаметр пальцев составляет 15...20 мм, средняя длина кисти — 192,14±4,95 мм, длина среднего пальца 81,5±5,7 мм.

Усилия, развиваемые руками, различны при различных положениях: в среднем максимальная мгновенная сила притяжения к корпусу двумя руками составляет 1000 Н, статическое усилие в этом же направлении — 300 Н, сила разгибания руки в крайних положениях — 60 Н, согнутой под прямым углом — 14 Н, мгновенная сила сжатия кистью — максимум 45 Н, статическое усилие сжатия — 12...15 Н. Мышечная сила человека достигает максимума к 25 годам, между 30 и 60 годами она снижается на 50 %, при этом сила рук уменьшается на 20 %.

Рассмотренные физиологические характеристики человека-оператора играют определяющую роль при проектировании эргономичных человеко-машинных вычислительных систем. Их учет крайне важен как для создания современной и конкурентоспособной продукции, так и при организации работы с вычислительными системами.

Факторы, определяющие мобилизационные возможности человека-оператора

При разработке информационных систем (АСУ, диспетчерских систем и т. п.) необходимо учитывать мобилизационные возможности человека-оператора — т.е. его способность перейти из состояния пассивного ожидания в состояние активного принятия решений. Мобилизационные возможности каждого человека во многом субъективны и зависят от большого числа факторов, но все же основным является интегральная экстенсивная напряженность деятельности (нагрузка), которая вызывает утомление и соответственно снижение мобилизационных возможностей. Помимо абсолютной величины нагрузки на степени развития утомления сказывается еще ряд факторов, среди которых необходимо выделить следующие [25, 31]:

- статический или динамический характер нагрузки;
- интенсивность нагрузки, т. е. ее распределение во времени;
- постоянный или ритмический характер нагрузки.

В зависимости от совокупности и величины данных фактов человек-оператор может находиться в двух состояниях — адекватной мобилизации (САМ) и динамического рассогласования (СДР).

Состояние адекватной мобилизации — такое состояние оператора, которое является оптимальным или близким к оптимальному для данных условий работы человека, включенного в конкретную систему управления. Симптоматика и выраженность этого состояния зависит, прежде всего, от объема информации, ее плотности и экстенсивности, от семантической значимости информации, характера кодирования, наличия шума, требуемых программ реализации принятой информации и особенностей управляемой системы. Чем больше требуемое состояние отличается от состояния оперативного покоя, тем больше выражена активная мобилизация. Характерной чертой адекватной мобилизации является ее линейность, т. е. наличие прямой зависимости от субъективной трудности выполняемой работы. Первым шагом диагностики этого состояния является количественный анализ информационной модели рабочего процесса для выяснения, какой элемент этой деятельности в первую очередь определяет степень адекватной мобилизации. В большинстве случаев оперативной точкой для суждения служит положение найденных характеристик на шкале предельных возможностей человека (см. табл. 12.6 и 12.7).

Состояние динамического рассогласования — такое состояние оператора, при котором нарушается основная закономерность предыдущей стадии — уровень работы по восприятию информации не соответствует ожидаемому физиологическому состоянию. О таком состоянии свидетельствуют большие сдвиги вегетативных реакций, появление дополнительных реакций,

в частности потоотделения, расширение сосудов кожи, нарушение мышечного баланса и др. Это состояние чрезвычайно важно для оценки работы человека-оператора, поскольку оно сопровождается выраженными нарушениями работоспособности и появлением большого числа ошибок, лишними действиями, увеличением времени работы, вплоть до отказа от работы или ее прекращения.

В общем случае восприятие и переработка информации зависят как от психологических возможностей человека, так и нервно-психологической напряженности. При большой нервно-психологической напряженности работы особое внимание должно быть обращено на концентрацию внимания, должны быть сведены к минимуму отвлекающие факторы оператора и обеспечены наилучшие условия восприятия и переработки информации. При проектировании человеко-машинных систем необходимо учитывать и то, что на точность функционирования всей системы в целом большое влияние оказывает и квалификация оператора, причем влияние ошибок оператора на точность системы сильнее, чем влияние несовершенства конструкции.

Психологические характеристики человека-оператора

Под психологическими характеристиками человека-оператора понимают состояния, вызванные переживанием человека, его отношение к внешнему миру и к самому себе. Они определяются изменениями количественных и качественных параметров реакций на воздействия внешней среды. Психологическое (эмоциональное) состояние тесно связано с индивидуальной семантической значимостью поступающей к человеку информации и являются как бы коррекцией, вносимой человеком в ответ, определяемый только информационной структурой раздражителя.

В случаях, когда наступает динамическое рассогласование между объективной значимостью ситуации и ее субъективной оценкой, появляются связанные с этим отрицательные изменения в двигательных и психических функциях, наступает состояние эмоциональной напряженности. При этом наблюдается снижение устойчивости ряда психических функций. Момент перехода эмоционального напряжения в эмоциональную напряженность определяет так называемую эмоциональную устойчивость. Чем меньше эмоциональная устойчивость, тем скорее при меньших значениях эмоционального фактора развивается состояние эмоциональной напряженности. Эмоциональная устойчивость является показателем, очень тесно связанным с таким свойством личности, как уровень тревожности. Эмоциональная устойчивость очень низкая у лиц с высоким уровнем тревожности.

К *внешним эмоциогенным факторам* относятся прежде всего так называемые экстремальные факторы, физические или информационные харак-

теристики которых ведут к развитию крайней степени напряжения физиологических и психологических функций с полным исчерпанием всех физиологических резервов. Чем более выражена экстремальность фактора, тем выше вероятность появления выраженных степеней эмоциональных сдвигов. Характер этих сдвигов определяется видом реакции, развивающейся в результате воздействия. В случае формирования адекватной реакции, т. е. реакции, направленной на преодоление действий фактора или на поддержание необходимого уровня деятельности при продолжении действия экстремальности, как правило, наблюдается та или иная степень эмоционального напряжения.

12.2. Организация рабочего места при эксплуатации ЭА

Компоновка и организация рабочего места человека-оператора при эксплуатации ЭА, будь то ПЭВМ или распределенная вычислительно-телекоммуникационная сеть, должны прежде всего основываться на учете его антропометрических и психофизиологических параметров, рассмотренных в § 12.1. Перед разработкой плана размещения оборудования необходимо установить:

- основные ограничения на размещение оборудования, изложенные в ТЗ, исходя из специфики ЭА и условий ее эксплуатации;
- перечень элементов, узлов, блоков и элементов контроля и управления, которые должны быть доступны человеку-оператору при обслуживании вычислительной техники;
- перечень необходимых зрительных и звуковых информационных указателей;
- требования к внешним условиям работы (шумы, вибрации, климат и т. п.).

После определения данных показателей можно приступать к планировке рабочего места, размещению необходимого основного и вспомогательного оборудования и т. п. При этом следует исходить из общих базовых требований к размерам рабочих зон, приведенным на рис. 12.4.

При эксплуатации современной ЭА рабочие места можно разделить на две категории: рабочее место человека-оператора, выполняющего чаще всего диспетчерские функции, и рабочее место вспомогательного персонала (руководство, программисты, ремонтники, технический персонал и т. п.). При этом под рабочим местом понимается зона, оснащенная необходимыми техническими средствами, в которой человек выполняет свои должностные обязанности.

При проектировании рабочего места необходимо учитывать рабочую позу человека, требования к углу обзора, наличие функциональных рабочих по-

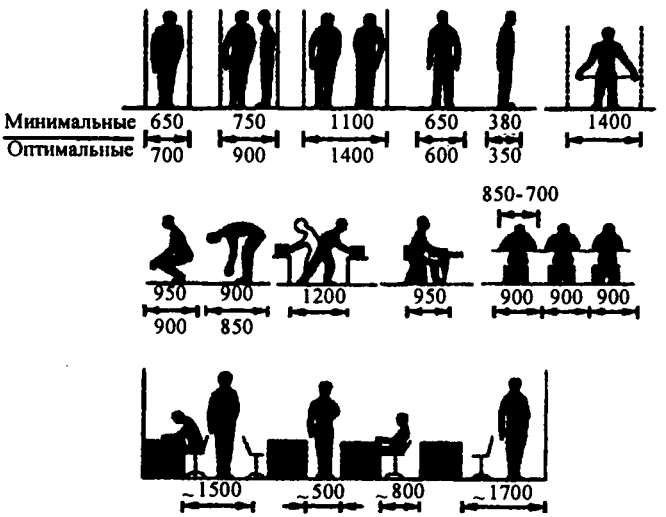


Рис. 12.4. Рекомендуемые размеры рабочих зон

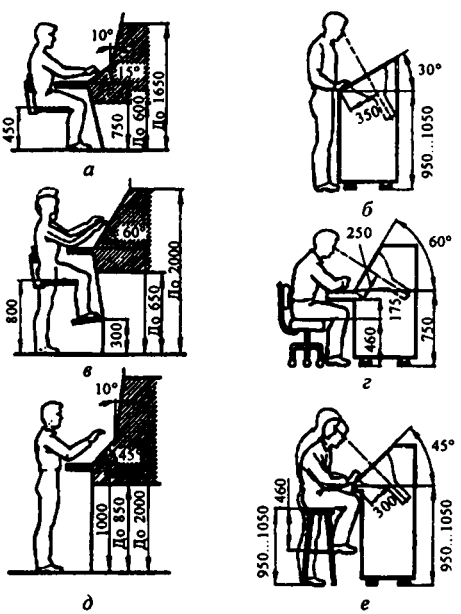


Рис. 12.5. Рабочее место человека-оператора при работе с визуальными средствами отображения информации

верхностей, например, для письма или монтажа, наличие пространства для размещения оборудования, конфигурацию и размеры органов управления, последовательность и скорость поступления и обработки информации, частоту использования органов управления и их связь с элементами индикации.

Рабочие зоны, в зависимости от пространственного положения человека-оператора, делят на зоны для работы стоя и сидя (рис. 12.5). В особых случаях человек-оператор работает полусидя, полулежа, зона расположения органов управления при этом ограничена и в основном определяется не столько вычислительной аппаратурой, а комплексом средств управления объектом.

При конструировании рабочего места у стоек для работы стоя

все пределы досягаемости и максимального поля зрения должны приниматься из расчета нормальной работы оператора низкого роста. В этом случае высокий человек достанет любой орган управления. Если же рабочее место представляет собой закрытое помещение, то его нужно проектировать под оператора высокого роста, тогда люди среднего и низкого роста будут чувствовать себя в таком помещении комфортно. Схемы размещения рабочих мест должны учитывать расстояния между рабочими столами с дисплеями (в направлении тыла поверхности одного видеомонитора и экрана другого видеомонитора), которое должно быть не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов — не менее 1,2 м. Рабочие места по отношению к световым проемам должны располагаться так, чтобы естественный свет падал сбоку, преимущественно слева.

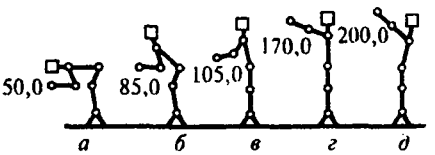


Рис.12.6. Разбиение рабочей зоны на подзоны при работе оператора стоя

Рабочую зону для работы оператора по высоте делят на следующие подзоны (рис. 12.6): нижняя неудобная (0...50 см от пола); нижняя менее удобная (50...85 см); удобная (85...105 см); верхняя менее удобная (105... ...170 см); верхняя неудобная (170...200 см). Исходя из этого, высоту стоек не рекомендуется выполнять более 200 см. Важным при работе стоя являются пределы досягаемости рук до органов управления и обзора, необходимость поворота головы или наклона туловища. Зоны досягаемости рук и рекомендуемые места расположения органов управления и индикации приведены на рис. 12.7. Как видно из этого рисунка, зона досягаемости рук представляет собой эллипс с вертикальной осью 100 см и горизонтальной осью 135 см. Это не максимальные пределы досягаемости рук, а пределы, учитывающие осуществление движения руками в различных направлениях с обеспечением достаточных усилий.

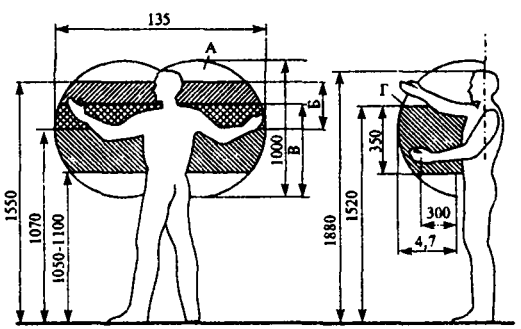


Рис. 12.7. Зоны досягаемости рук и рекомендуемые места расположения органов управления и индикации при работе оператора стоя:

А — рабочее пространство; Б — оптимальная зона для зрительного наблюдения; В — оптимальная зона для размещения органов управления; Г — зона удобного размещения устройств, обслуживаемых руками

При конструировании оборудования и организации рабочего места человека-оператора при работе сидя следует

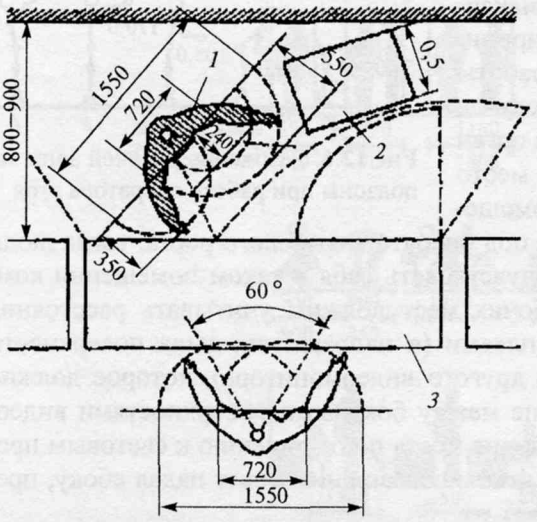


Рис. 12.8. Примерная организация рабочего места человека-оператора при обслуживании монтажных стоек

обеспечить соответствие конструкции всех элементов рабочего стола и их взаимного расположения эргономическим требованиям с учетом характера выполняемой пользователем деятельности, комплексности технических средств, форм организации труда и основного рабочего положения оператора. Примерная организация рабочего места человека-оператора при обслуживании монтажных стоек, установленных параллельно неподвижной стене, показана на рис. 12.8.

Зоны досягаемости рук и зоны обзора человека-оператора, работающего в положении сидя, представлены на рис. 12.9. Участки A_1, A_2 и Б образуют зону основных движений, в которой для манипуляций руками не требуется поворота туловища. Участки В и Г образуют зону вспомогательных движений. Для манипуляций руками на участках В требуется движение всей руки, а на участках Г — поворот туловища. Обзор этих участков осуществляется поворотом головы и туловища. Очевидно, что для удобства работы оператора органы управления следует по возможности располагать на участках A_1, A_2 и Б, а элементы индикации — на участках A_1 и A_2.

Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей (размер ПЭВМ, дисплея, клавиатуры и т. д.), характера выполняемой работы. При этом допускается использование рабочих столов различных конструкций, отвечающих современным

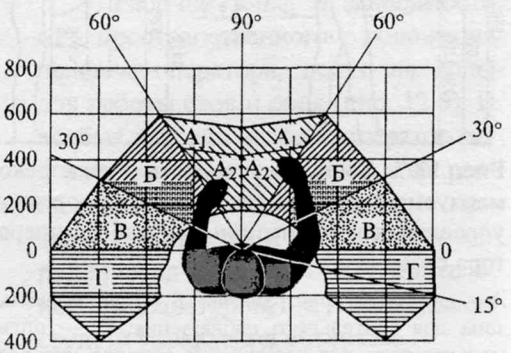


Рис. 12.9. Зоны досягаемости рук оператора и зоны обзора при работе сидя

требованиям эргономики (рис. 12.10). Стол должен быть достаточно большой, чтобы уместить клавиатуру, мышь, дисплей (монитор) и рабочие документы. Экран монитора следует располагать от глаз человека-оператора на расстоянии 600...700 мм, но не ближе 500 мм с учетом установленной разрешающей способности и размеров символов. Верхняя граница расположения монитора не ниже 15 см от уровня глаз, монитор и держатель для документов, как правило, размещаются непосредственно перед пользователем, а не сбоку, примерно на расстоянии вытянутой руки от пользователя. Для поддержания запястий в ненапряженном положении можно использовать специальные подставки или держатели для клавиатуры и мыши.

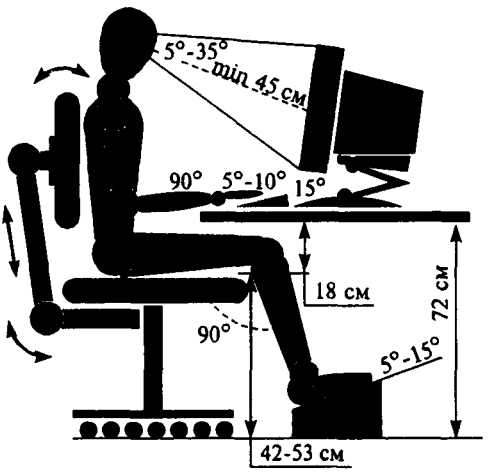


Рис. 12.10. Положение человека-оператора при работе сидя за рабочим столом

Требования к микроклимату в помещениях с ЭА

В помещениях с ЭА (системы управления, ЭВМ и др.) должны обеспечиваться оптимальные для человека-оператора параметры микроклимата, приведенные в табл. 12.14 и на рис. 8 цветной вклейки. Скорость движения воздуха при этом должна быть не более 0,1 м/с.

Таблица 12.14. **Оптимальные и допустимые параметры температуры и относительной влажности воздуха в помещениях с ЭА**

Оптимальные параметры		Допустимые параметры	
Температура, °С	Относительная влажность, %	Температура, °С	Относительная влажность, %
19	62	18	39
20	58	22	31
21	55	—	—

Для обеспечения необходимых параметров микроклимата помещение должно быть подключено к системе отопления и оборудовано приточно-вытяжной вентиляцией. Для повышения влажности воздуха следует приме-

нять увлажнители воздуха, заправляемые ежедневно дистиллированной водой или прокипяченной питьевой водой.

Уровни положительных и отрицательных аэроионов в воздухе помещений должны соответствовать нормам, приведенным в табл. 12.15.

Таблица 12.15. **Уровни ионизации воздуха помещений**

Уровни ионизации воздуха	Число ионов в 1 $см^3$ воздуха	
	n^+	n^-
Минимально допустимый	400	600
Оптимальный	1500...3000	3000...5000
Максимально допустимый	50000	50000

Содержание вредных химических веществ в атмосфере помещений не должно превышать среднесуточных концентраций для атмосферного воздуха.

Требования к уровню шума и вибраций в помещениях с ЭА

При работе с ЭА уровень звука на рабочем месте не должен превышать 50 дБА, а уровень вибрации — допустимых значений, приведенных в «Санитарных нормах вибрации рабочих мест» (табл. 12.16).

Таблица 12.16. **Допустимые нормы вибрации на рабочих местах с ЭА**

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	Допустимые значения (по осям *X*, *Y*)			
	по виброускорению		по виброскорости	
	$мс^{-2}$	дБ	$мс^{-1}$	дБ
2	5,3·10	25	4,5·10	79
4	5,3·10	25	2,2·10	73
8	5,3·10	25	1,1·10	67
16	1,0·10	31	1,1·10	67
31,5	2,1·10	37	1,1·10	67
63	4,2·10	43	1,1·10	67

Оборудование (принтеры и т. п.), уровни шума которого превышают нормированные, должно располагаться в отдельных помещениях.

Для снижения уровня шума используют звукопоглощающие материалы. Дополнительным звукопоглощением служат однотонные занавеси из плотной ткани, гармонирующие с окраской стен и подвешенные в складку на расстоянии 15...20 см от ограждения. Ширина занавеси должна быть примерно в два раза больше ширины окна.

Особенности проектирования человеко-машинных систем с позиций обеспечения требований к уровню шума и вибрациям

При проектировании средств защиты человеко-машинных систем от шума и вибраций необходимо разработать такую систему гашения (СГ), которая бы обеспечила требуемую степень уменьшения шума и/или вибраций. При этом необходимо учитывать, что чем сложнее система, тем выше ее стоимость, больше массогабаритные характеристики и ниже надежность. Все это делает задачу проектирования средств защиты от шума человеко-машинных управляющих систем сложной, многовариантной задачей.

На этапе разработки ТЗ для рабочих мест личного состава и элементов технических систем важно правильно оценить уровни влияния дестабилизирующих факторов, в том числе и акустических шумов и вибраций. При этом необходимо проанализировать процесс шумовиброобразования и определить вклад в общую картину нагрузки от каждого из источников. После сравнения найденного уровня с нормативными показателями при необходимости принимается решение о выборе варианта построения средств защиты. Наиболее сложным на практике оказывается правильный выбор варианта реализации системы гашения, который осуществляется на основе анализа различных критериев, например, для систем защиты от акустических шумов анализируют характер акустического воздействия (стохастический или детерминированный), вид спектра (узко- или широкополосный), распределение областей концентрации основной энергии в спектре (низкочастотное, высокочастотное или сплошное). Комбинация различных наборов данных факторов обусловливает эффективность выбора того или иного варианта построения системы гашения. Поскольку таких вариантов много, то возможность выбора уже на начальном этапе эффективного способа реализации системы гашения для конкретного случая позволит сократить сроки и стоимость разработки.

После разработки комплекса шумозащитных средств объекта оцениваются общие надежностные характеристики человеко-машинной управляющей системы в целом, проверяются ее характеристики, связанные с шумогашением (например, тепловой баланс и т. п.). В случае удовлетворения всех требований ТЗ можно переходить к разработке опытного и серийных образцов, в противном случае необходимо принять меры конструктивного характера по корректировке конструкции объекта.

Методы борьбы с акустическим шумом настольных ЭА

Даже если сам по себе один компьютер излучает невысокий уровень шума, то может оказаться, что при размещении нескольких ПЭВМ, а тем

более серверов шум от них станет значительно влиять на общий уровень комфорта в помещении. Даже один домашний компьютер, оснащенный, например, SCSI накопителем (имеющим бóльшие обороты вращения, чем IDE, и, следовательно, более высокий уровень шума) может вызвать высокий уровень шума в помещении.

Методы борьбы с шумом подразделяют на пассивные и активные. И те, и другие предусматривают использование специальных дополнительных средств для снижения шума. Разнообразные поглотители, демпферы, звукоизоляторы, называемые пассивными средствами защиты, обладают эффективным поглощением только при линейных размерах шумогасящих конструкций, сравнимых с длиной волны излучения. Их эффективность растет с ростом частоты акустических волновых воздействий, при этом на низких частотах (до 500 Гц) их эффективность крайне мала. Альтернативой пассивным методам защиты являются системы активного гашения (САГ), в которых гашение шумового поля достигается наложением на исходное поле другого поля, инверсного по отношению к гасимому, причем наиболее эффективны активные средства при снижении акустических воздействий в частотном диапазоне до 500 Гц. Большинство пассивных методов борьбы с шумом имеют опасный побочный эффект — снижают степень охлаждения различных узлов компьютера, в активных средствах этот недостаток отсутствует [9, 36].

Практически весь шум в акустическом диапазоне производится механическими элементами вычислительной системы — накопителем на жестком диске (винчестером), вентилятором блока питания, вентилятором процессора, дисководом, клавиатурой и др.

Рассмотрим методы борьбы с шумом каждого из перечисленных источников. Практически все винчестеры являются источником шума. Кроме того, винчестер вибрирует при работе, что может вызвать резонансные колебания всего корпуса. Чтобы избежать этого, его нужно виброизолировать, для чего можно использовать конструктивы для установки в 5-дюймовый отсек и использовать прокладки из губчатой резины или другого материала (рис. 12.11). Если конструктивно это невозможно, то можно использовать пластмассовый Mobile Rack (рис. 12.12). Защитные крышки, надеваемые на Mobile Rack сверху и снизу, тоже должны гасить звук, однако они препятствуют нормальной вентиляции винчестера. Такими же методами снижают шум от дисководов на гибких магнитных дисках.

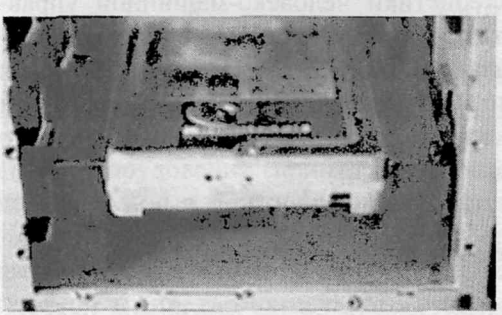
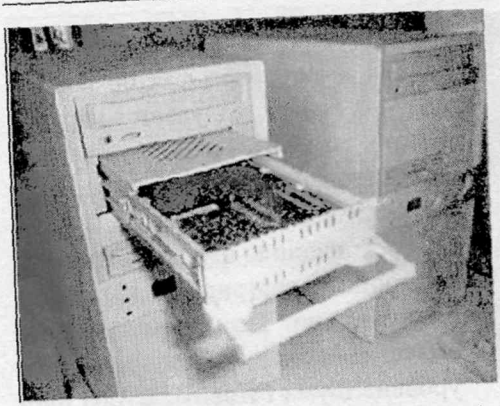


Рис. 12.11. Винчестер на ножках



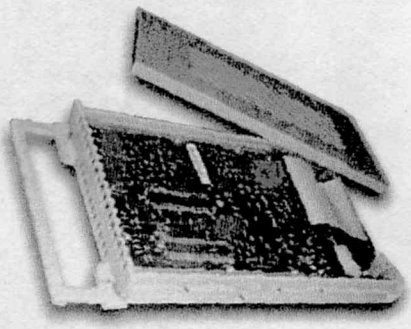


Рис. 12.12. Mobile Rack для установки винчестера

Вентилятор блока питания так же, как и винчестер, является источником шума. Один из методов борьбы с этим шумом — снижение напряжения, подаваемого на вентилятор (чтобы уменьшить его обороты). Если вентилятор крепится к железному корпусу, то последний является источником дополнительных вибраций. Кроме того, поток воздуха от вентилятора, ударяясь о защитную решетку, вызывает дополнительный шум. Для снижения шума можно снять кожух с блока питания, отвинтить вентилятор и установить его на резиновых растяжках, не привинчивая кожух на место (рис. 12.13). Однако после этого уменьшится приток воздуха

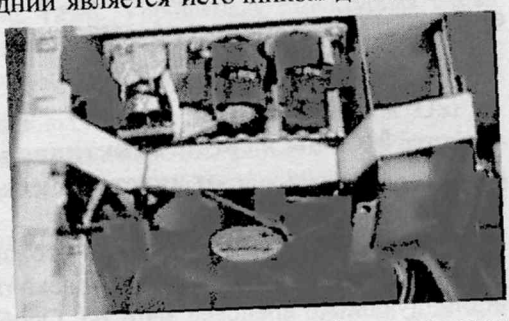
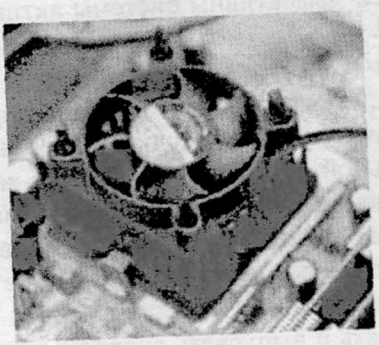
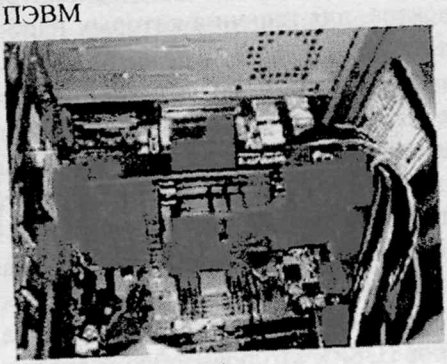


Рис. 12.13. Вентилятор блока питания ПЭВМ



а



б

Рис. 12.14. Вентилятор на процессоре P5 (*а*) и на процессоре PII (*б*)

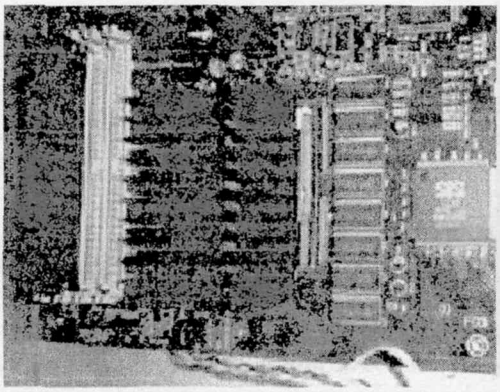


Рис. 12.15. Пассивный игольчатый радиатор на процессоре P5

через отверстия в корпусе. Если ПЭВМ имеет форм-фактор BABY-AT, т. е. воздух выдувается наружу, можно снизить шум, установив «глушитель» на наружную решетку блока питания.

Снижение шума вентилятора процессора (рис. 12.14) также очень важно. По своему уровню его шум может даже превышать уровень шума от вентилятора блока питания. Одним из решений этой проблемы является использование пассивного игольчатого радиатора (рис. 12.15), у которого бóльшая площадь и поэтому лучшая теплоотдача. Игольчатый радиатор крепят термопастой, наносимой тонким слоем между процессором и радиатором, которая заполняет полости и обеспечивает почти полный контакт поверхностей [http://mpsystem.iu4.bmstu.ru].

Методы и средства активной индивидуальной защиты от акустических воздействий

В авиации, на транспорте, в производственных цехах для обеспечения нормальных условий работы человека-оператора необходимо использовать индивидуальные средства защиты. Особенно неблагоприятно воздействуют на человека волновые поля с концентрацией энергии в низкочастотной части спектра, для гашения которых наиболее эффективны системы активного гашения.

Первые системы активной защиты (САГ) появились в начале 30-х годов XX в. Они состояли из микрофона, блока управления, включавшего усилитель, линии задержки и фильтры, и излучателя. В настоящее время появились системы активной индивидуальной защиты, включающие головные телефоны с установленными в них элементами САГ, например, для обслуживающего персонала палубной авиации, технологического оборудования и т. п. В последние годы нашли распространение микропроцессорные системы индивидуальной акустозащиты на основе цифровых сигнальных процессоров (DSP), что позволило разрабатывать и выпускать средства индивидуальной акустозащиты, ориентированные не только на профессионалов, но и на массового потребителя. Широкое распространение получили два типа

САГ: неадаптивные и адаптивные. Упрощенная структурная схема неадаптивной САГ приведена на рис. 12.16. Информация о внешнем шумовом поле, воспринимаемая системой датчиков (микрофонов), после оцифровки поступает в блок управления. Здесь методами цифровой обработки генерируется сигнал, идентичный по спектру исходному, но находящийся к нему в противофазе. Блок управления можно реализовать различными способами — от программируемой логики до специальных вычислителей, но наиболее перспективным представляется применение специально разработанных для обработки в режиме реального времени цифровых сигнальных процессоров (DSP).

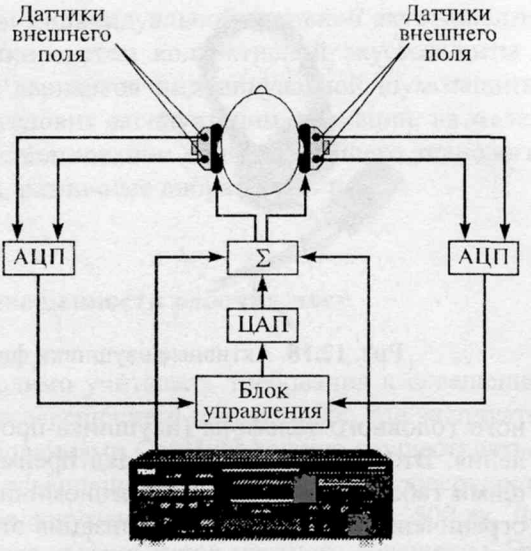


Рис. 12.16. Упрощенная структурная схема модели неадаптивной системы индивидуальной акустозащиты

В адаптивных САГ (АСАГ) помимо вышеперечисленных систем датчиков исходного поля используются дополнительно системы датчиков сигнала ошибки гашения. Вырабатываемый ими сигнал является управляющим для блока управления (БУ). Этот же сигнал используется для воздействия на фильтры БУ, которые, перестраиваясь с помощью специальных адаптивных алгоритмов, минимизируют сигнал ошибки. Упрощенная структурная схема адаптивной системы представлена на рис. 12.17.

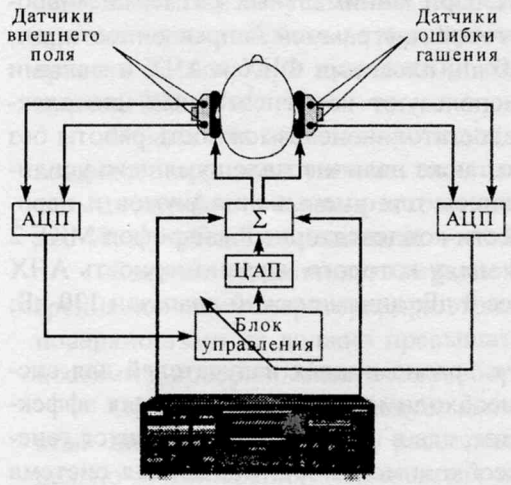
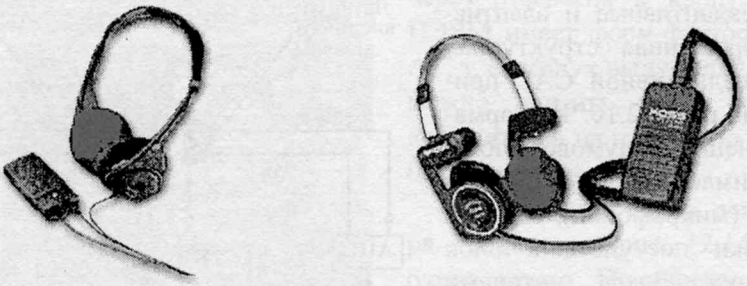


Рис. 12.17. Упрощенная структурная схема адаптивной системы индивидуальной акустозащиты

Конструктивно системы индивидуальной активной защиты могут быть выполнены в виде облегченных головных телефонов открытого или закрытого типа или в виде слухового аппарата, т. е. миниатюр-



а *б*

Рис. 12.18. Активные наушники фирм Sennheiser (*а*) и Koss (*б*)

ного головного телефона (наушника-пробки) с автономным блоком управления. Второй вариант имеет ряд преимуществ, например, обладает меньшими габаритами и массой, эргономичностью излучателя, но в силу ряда ограничений практическая реализация этого варианта затруднительна. В качестве примера реализации системы индивидуальной защиты первого вида можно привести продукцию фирм Sennheiser (ФРГ) и Koss (США) (рис. 12.18).

Уменьшение размеров акустических преобразователей, снижение их массы и улучшение эргономичности являются одной из важнейших проблем проектирования систем индивидуальной активной акустозащиты. Размещение в амбушюрах головных телефонов накладывает ограничения не только на размеры датчиков внешнего поля, но и на диаграмму их направленности, динамический диапазон, форму АЧХ. При минимальных размерах микрофоны должны характеризоваться круговой диаграммой направленности, динамическим диапазоном не менее 100 дБ, плоскими ФЧХ и АЧХ и малыми переходными искажениями. Чаще используют конденсаторные или электретные микрофоны, но у них есть недостаток — невозможность работы без внешнего блока питания. Желательно также наличие малошумящего усилителя с высоким входным сопротивлением для уменьшения шумов и наводок. В качестве примера можно привести конденсаторный микрофон МКЕ 2 P-C фирмы Sennheiser с диаметром 4 мм, у которого неравномерность АЧХ лежит в диапазоне 20...20 000 Гц менее 3 дБ; динамический диапазон 130 дБ; чувствительность 10 мВ/Па.

При разработке миниатюрных и эргономичных излучателей для систем индивидуальной акустозащиты необходимо учитывать, что для эффективного воспроизведения низких частот, где в основном и приходится генерировать противофазные сигналы, необходимо, чтобы подвижная система излучателя перекачивала значительный объем воздуха. Этого можно добиться двумя путями: увеличением диаметра диафрагмы и увеличением хода подвижной системы.

В настоящее время системы индивидуальной активной акустозащиты находят применение при создании систем коллективной акустозащиты и разработки специализированных вариантов индивидуальной шумозащиты, ориентированных на различные условия эксплуатации в авиации, на железнодорожном транспорте и при использовании сильношумящего технологического оборудования (мотопилы, различные вибраторы и т. п.).

Требования к освещенности рабочих мест

При разработке ЭА необходимо учитывать требования к освещенности рабочих мест. Искусственное освещение в помещениях, где эксплуатируется ЭА, в соответствии с требованиями СанПиН должно осуществляться системой общего равномерного освещения. Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300...500 лк. Дополнительно допускается установка светильников местного освещения. Это освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана и увеличивать освещенность экрана более 300 лк. Следует также ограничивать прямую блесткость от источников освещения, при этом яркость светящихся поверхностей, находящихся в поле зрения, должна быть не более 200 кд/м^2. Следует ограничивать отраженную блесткость на рабочих поверхностях за счет правильного выбора типов светильников и расположения источников естественного и искусственного освещения по отношению к рабочим местам, при этом яркость бликов на экране мониторов не должна превышать 40 кд/м^2, а яркость потолка при применении отраженного освещения не должна превышать 200 кд/м^2.

Показатель ослепленности для источников общего искусственного освещения в производственных помещениях должен быть не более 20, показатель дискомфорта в административно-общественных помещениях — не более 40, в учебных помещениях — не более 25.

Следует ограничивать неравномерность распределения яркости в поле зрения человека-оператора, при этом соотношение яркости между рабочими поверхностями не должно превышать 3:1—5:1, а между рабочими поверхностями и поверхностями стен и оборудованием — 10:1.

Общее освещение следует выполнять в виде сплошных или прерывистых линий светильников, расположенных сбоку от рабочих мест, параллельно линии зрения пользователя при рядном расположении ЭА. При периметрическом расположении аппаратуры линии светильников должны располагаться локализовано над рабочим столом ближе к его переднему краю, обращенному к оператору.

Для освещения помещений с ЭА следует применять светильники серии ЛПО36 с зеркализованными решетками, укомплектованные высокочастотными пускорегулирующими аппаратами (ВЧ ПРА). Допускается использовать светильники прямого света типа П, преимущественно прямого света типа Н, преимущественно отраженного света типа В. Применение светильников без рассеивателей не допускается.

При использовании отраженного освещения в производственных и административно-общественных помещениях допускается применение металлогалогенных ламп мощностью до 250 Вт. Допускается применение ламп накаливания в светильниках местного освещения.

Яркость светильников общего освещения в зоне углов излучения от 50 до 90° с вертикалью в продольной и поперечной плоскостях должна составлять не более 200 кд/м^2, защитный угол светильников должен быть не менее 40°. Светильники местного освещения должны иметь не просвечивающий отражатель с защитным углом не менее 40°.

Коэффициент запаса для осветительных установок общего освещения должен приниматься равным 1,4. Коэффициент пульсации не должен превышать 5 %. При отсутствии светильников с ВЧ ПРА лампы многоламповых светильников или рядом расположенные светильники общего освещения следует включать в разные фазы трехфазной сети.

Для обеспечения нормируемых значений освещенности в помещениях использования ЭА следует проводить чистку стекол оконных рам и светильников не реже двух раз в год и проводить своевременную замену перегоревших ламп.

Требования к электро- и пожаробезопасности

При работе с ЭА человек-оператор может подвергаться воздействию электротока или огня в случае возникновения пожара в помещении.

В целях защиты пользователя ЭА от перечисленных факторов необходимо соблюдение им мер электро- и пожаробезопасности, в том числе использование только исправных устройств (ЭВМ и т. п.). Рабочее помещение должно быть оборудовано системой мониторинга с использованием датчиков дыма и огня. В доступном месте должны быть расположены углекислотные огнетушители и аптечки первой помощи.

Основные меры защиты от поражения током:

- обеспечение недоступности токоведущих частей, находящихся под напряжением, для случайного прикосновения применением защитных кожухов, изоляции и скрытия открытой проводки в кабельных каналах;
- устранение опасности поражения при появлении напряжения на корпусах, кожухах и других частях электрооборудования защитным заземлением;
- организация безопасной эксплуатации электроприборов.

Категория производства по пожарной опасности в значительной степени определяет требования к зданию, его конструкциям и планировке, организацию пожарной охраны и ее техническую оснащенность, требования к режиму и эксплуатации. Согласно нормативным документам помещение, в котором эксплуатируется стационарная ЭА, относится к категории В — производство, в котором используются горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыль).

12.3. Проектирование эргономичных узлов и устройств ЭА

Проектирование устройств отображения информации

Устройства отображения информации являются неотъемлемой частью практически любой информационной и управляющей системы, причем именно они во многом определяют эргономические параметры системы в целом, так как находятся непосредственно на рабочем месте человека-оператора.

К мониторам часто применяют правило «чем больше, тем лучше». Выбор размера и разрешения экрана зависят в основном от прикладной задачи. Для систем общего назначения наиболее удобным является монитор с размером трубки 15...19". Под размером монитора чаще всего подразумевают размер стекла электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), хотя истинный размер изображения на таких мониторах, измеренный от угла к углу по диагонали, обычно на 1 дюйм меньше размера монитора. Комбинации размера монитора и установленного разрешения должны соответствовать требованиям ISO 9241/3 — международного стандарта по эргономике мониторов (табл. 12.17). Символы малых размеров могут также оказаться в противоречии с требованиями действующего законодательства по безопасному использованию экранов.

Таблица 12.17. **Конструктивные характеристики мониторов**

Номинальный размер монитора (по диагонали), дюйм	Типовой размер изображения, дюйм	Минимальное разрешение	Максимальное разрешение
14	12,3...13	640x480	800x600
15	13,5...14	640x480	1024x768
17	15,5...16	800x600	1280x1024
19	17,5...18,1	1024x768	1280x1024
20/21	19...20	1024x768	1600x1200
24	21...22	1600x1000	1920x1200

В общем случае конструкции дисплейных терминалов и средств индикации и управления должны обеспечивать возможность фронтального наблюдения экрана путем поворота корпуса в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси в пределах ±30 град и в вертикальной плоскости вокруг горизонтальной оси в пределах ±30 град с фиксацией в заданном положении. Дизайн дисплеев, клавиатуры и других блоков и устройств ЭА должен предусматривать окраску корпуса в спокойные мягкие тона с диффузным рассеиванием света, они должны иметь матовую поверхность одного цвета (без блестящих деталей, способных создавать блики) с коэффициентом отражения 0,4...0,6. На лицевой стороне корпуса дисплея не рекомендуется располагать органы управления, маркировку, надписи и обозначения. При необходимости расположения органов управления на лицевой панели дисплея они должны закрываться крышкой или быть углублены в корпусе.

Для обеспечения надежного считывания информации при соответствующей степени комфортности ее восприятия должны быть определены оптимальные и допустимые диапазоны визуальных эргономических параметров, визуальные пределы изменения которых приведены в табл. 12.18.

Конструкция мониторов должна предусматривать органы регулировки яркости и контраста, быть простой и не раздражать глаза. Следует избегать ярких и темных тонов (рис. 12.19).

Таблица 12.18. **Визуальные эргономические параметры дисплеев и пределы их изменений**

Параметр	Пределы значений параметров	
	минимальные (не менее)	максимальные (не более)
Яркость знака (фона), измеряемая в темноте, кд/м^2	35	120
Внешняя освещенность экрана, лк	100	250
Угловой размер знака, угл. мин.	16	60

Отдельным классом выделяют мониторы на жидкокристаллических индикаторах (ЖКИ) (рис. 12.20) и газоплазменных панелях (ГПП).

К достоинствам мониторов на ЖКИ и ГПП можно отнести то, что они действительно плоски в буквальном смысле этого слова, а создаваемое на их экранах изображение отличается четкостью и насыщенностью цветов. В них отсутствуют искажения на экране и другие недостатки, свойственные традиционным мониторам на электронно-лучевых трубках (ЭЛТ).

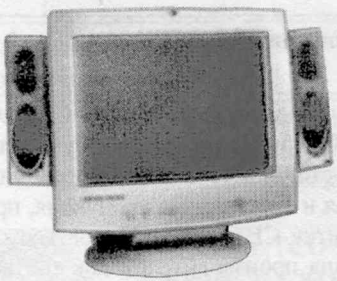


Рис. 12.19. Внешний вид мультимедийного монитора на ЭЛТ



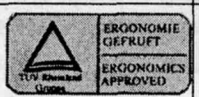
Рис. 12.20. Пример внешнего вида монитора с ЖКИ

Все используемые мониторы должны соответствовать международным и государственным стандартам, регламентирующим их применение. Каждый из таких стандартов имеет собственное обозначение, отображаемое на задней стенке монитора. В табл. 12.19 приведены условные обозначения и краткие описания основных стандартов.

Таблица 12.19. **Условные обозначения и описания стандартов на мониторы**

Условное обозначение	Описание
	Знак **Energy Star** учрежден агентством по защите окружающей среды при правительстве США (EPA). Системы, соответствующие стандарту Energy Star, должны иметь режим экономии мощности, при котором потребляется меньше 30 W. Система управления энергопотреблением монитора основана на спецификации EPA, реализация которой позволяет снизить энергопотребление системы в режиме бездействия на 60—80 % по сравнению с тем, сколько монитор потребляет энергии при работе в высоком разрешении и при большой глубине представления цвета
	Европейский стандарт по электрической безопасности оборудования EN60950:1992 (IEC950) включает специальные требования к мониторам на ЭЛТ. Мониторы, выпущенные после 01.01.1996 и имеющие знак CE, должны соответствовать требованиям директивы ЕС по электромагнитной совместимости. Мониторы, выпущенные после 01.01.1997 и имеющие знак CE, должны соответствовать также требованиям директивы ЕС по низким напряжениям (1989/336), что для мониторов означает обычно соответствие требованиям EN60950.

Продолжение табл. 12.19

Условное обозначение	Описание
	Наряду с другими стандартами, продукция со знаком CE должна удовлетворять требованиям EN55022 по радиоизлучениям и EN50081-1 и EN50082-1 по устойчивости к интерференции. С 01.01. 1996 г. вся электрическая и электронная продукция, продаваемая в ЕС, должна иметь метку CE. Метка CE подтверждает, что продукция была аттестована производителем как соответствующая требованиям ЕС по электромагнитной совместимости
	Стандарт Display Power Management System (DPMS) разработан ассоциацией Video Extended Standards (VESA) на способ оповещения монитора о необходимости перехода в резервный режим или режим малой мощности. Большинство мониторов, совместимых с Energy Star (т. е. имеющих режим малой мощности), поддерживают систему оповещения VESA DPMS. Некоторые мониторы имеют также дополнительные механизмы для перехода в резервный режим
	Международный стандарт по эргономике мониторов — ISO 9241, ч. 3 (EN29241-3) определяет совокупность требований к экранам дисплеев. Полное соответствие этому стандарту свидетельствует, что монитор соответствует требованиям директивы ЕС по эргономике устройств отображения информации
	Директива ЕС по работе с устройствами отображения информации (90/270/EEC) касается многих аспектов оборудования рабочего места пользователя, включая: экран и клавиатуру, стол и стул, место, освещение, нагрев, шумы и программное обеспечение. Соответствие требованиям стандарта ISO9241-3 — наилучшее свидетельство того, что оборудование удовлетворяет эргономическим требованиям директивы ЕС к отображению визуальной информации. При этом необходимо учитывать, что сборка устройства из компонентов, каждый из которых соответствует стандартам, не гарантирует соответствия требованиям стандарта всего устройства. К примеру, в стандарте ISO 9241/3 определены минимально допустимые размеры символов, но они зависят также от выбора операционной системы, программы и параметров, установленных пользователем
	Стандарт **TCO'92** разработан для мониторов и определяет величину максимально допустимых электромагнитных излучений при работе монитора, а также устанавливает стандарт на функции энергосбережения мониторов. Кроме того, монитор,

Продолжение табл. 12.19

Условное обозначение	Описание
	сертифицированный по TCO'92, должен соответствовать стандарту на энергопотребление NUTEK и соответствовать Европейским стандартам на пожарную и электрическую безопасность
	Стандарт **TCO'95** распространяется на весь персональный компьютер, т. е. на монитор, системный блок и клавиатуру и касается эргономических свойств, излучений (электрических и магнитных полей, шума и тепла), режимов энергосбережения и экологии. Стандарт TCO'95 существует наряду с TCO'92 и не отменяет последний. Требования TCO'95 по отношению к электромагнитным излучениям мониторов не являются более жесткими, чем по TCO'92. По эргономике TCO'95 предъявляет более строгие требования, чем международный стандарт ISO 9241
	Стандарт **TCO'99** предъявляет более жесткие требования, чем TCO'95 в следующих областях: эргономика (физическая, визуальная и удобство использования), энергия, излучение электрических и магнитных полей, окружающая среда и экология, а также пожарная и электрическая безопасность. Стандарт TCO'99 распространяется на все виды мониторов, портативные компьютеры (Laptop и Notebook), системные блоки и клавиатуры. Требования по энергосбережению включают в себя необходимость того, чтобы компьютер и/или монитор после определенного времени бездействия снижали уровень потребления энергии на одну или более ступеней. При этом период времени восстановления до рабочего режима потребления энергии должен устраивать пользователя
MPR II	Стандарт **MPR II** определяет максимально допустимые величины излучения магнитного и электрического полей, а также методы их измерения. MPR II базируется на концепции о том, что люди живут и работают в местах, где уже есть магнитные и электрические поля, поэтому электронные устройства (мониторы, компьютеры) не должны создавать электрические и магнитные поля, большие, чем те, которые уже существуют. Стандарты MPR II более мягкие, чем TCO
	Метка **Голубой ангел** внедряется германским правительством для обозначения «экологически дружественной» продукции. Монитор с меткой «Голубой ангел» должен соответствовать стандарту Energy Star по экономии мощности, иметь блочную

Окончание табл. 12.19

Условное обозначение	Описание
	конструкцию для упрощения модернизации и ремонта, контролируемый химический состав, соответствующие MPR II уровни излучения и конструктивную схему, обеспечивающую возможность повторного использования
	Метка **TUV ECO** означает, что отмеченная им продукция прошла проверку для продажи на германском рынке. GS — отметка о безопасности оборудования, которая в значительной мере определяет решение немецких компаний о закупке продукции
Nutek	Шведская спецификация *Nutek* требует, чтобы переход монитора в первый режим сохранения энергии происходил в том случае, если мышь или клавиатура не использовались в течение периода времени от 5 мин до 1 ч; при этом вернуться в полномасштабный режим работы монитор может за 3 с. В этом режиме мощность должна быть меньше 30 W, а желательно — меньше 15 W. Через 70 мин мощность, потребляемая монитором, должна быть обязательно снижена до уровня менее 8 W, а желательно — до уровня менее 5 W. Время возврата из второго режима не определено. Уровни экономного потребления энергии, определенные Nutek, включены в требования TCO'92 и TCO'95
DDC	Стандарт *DDC*, созданный консорциумом VESA (Video Electronics Standard Association), регламентирует возможность управления настройками графического терминала, например монитора, посредством программного обеспечения

Проектирование системных блоков ЭА

Системный блок является неотъемлемой частью ЭА. На передней стороне корпуса располагаются индикатор, дисководы, лампочки и кнопки; на задней — разъемы для подключения монитора и других устройств. Конструктивно системный блок вычислительной системы выполняют в так называемом «форм-факторе» AT, ATX и т. п. По геометрическим характеристикам выделяют блоки типа Slim, Desktop, MiniTower, Tower, MidleTower,

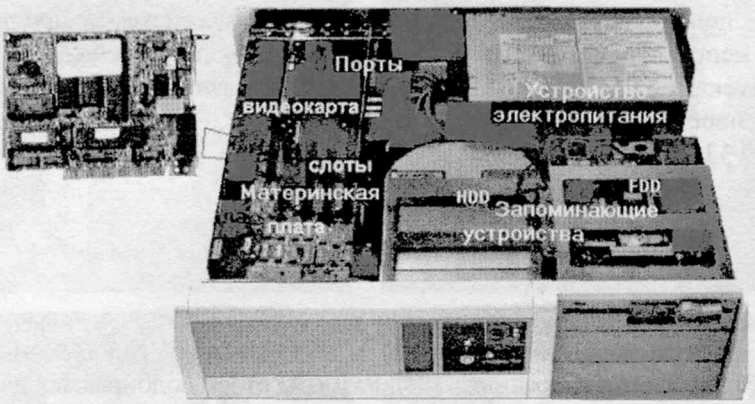


Рис. 12.21. Вид системного блока ПЭВМ сверху

BigTower, выполненные в виде 19" модулей для размещения в стойках, в специсполнении и др.

В соответствии с конструктивным исполнением требования к эргономике системного блока можно разделить на две группы:

- требования к эргономике внутреннего устройства (компоновки) системного блока, с точки зрения простоты доступа, ремонта и компактности (рис. 12.21);
- требования к эргономике внешнего устройства ПЭВМ, с точки зрения дизайна и требований к устройствам управления и индикации (рис. 12.22).

Конструирование эргономичных системных модулей ЭА (см. рис. 12.22) должно осуществляться согласно положениям VDI/ISO, международным стандартам и нормам: EN60950, VDE805, UL, CSA, CE, при этом для изготовления конструктивных деталей должна применяться исключительно по-

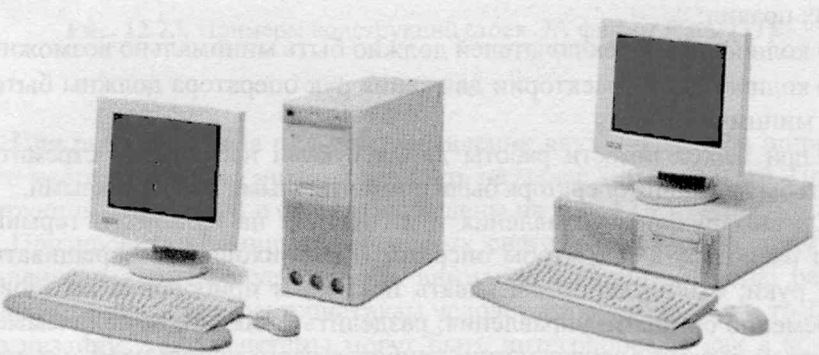


Рис. 12.22. Эргономичная конструкция системных блоков Tower и Desktop ПЭВМ производства АО «Марс» (г. Ульяновск) по лицензии Siemens

вторно используемая пластмасса. Вычислительные системы, предназначенные для использования в качестве серверов, должны удовлетворять серверным допускам: SEMKO, DEMKO, NEMKO. Паразитное излучение и помехоустойчивость должна быть в рамках стандарта CE и удовлетворять директивам: 89/336/ЕЭС, FCC.

Проектирование стоек ЭА

В состав электронных систем могут входить серверное, телекоммуникационное оборудование и терминалы, монтируемые в типовых монтажных стойках (чаще всего типоразмера 19"). Размеры стоек подбираются из типоразмерных рядов, приведенных в гл. 3. В стойке, как правило, предусматривается пульт управления, в этом случае она может выполнять функции терминала.

Рабочая поверхность практически любого пульта управления состоит из трех частей. Первая, горизонтальная, предназначена для осуществления оператором записей; размер и глубина этой поверхности, как правило, не превышает 400 мм. Вторая часть, плоскость которой наклонена к линии горизонта под углом приблизительно 15° , предназначена для установки органов управления (кнопок, тумблеров, клавиш, элементов индикации). Эта часть располагается в зоне, наиболее доступной рукам оператора. Третья часть, плоскость которой почти вертикальна (приблизительно 10° от вертикали), предназначена для установки элементов индикации, она располагается в зоне обзора глаз, не требующей поворота головы. Иногда вторую и третью поверхности объединяют вместе. В нижней части пульта необходимо предусмотреть пространство для ног (глубина — 480...550 мм, ширина — 450...600 мм, высота 615...650 мм).

При проектировании пульта управления следует придерживаться следующих правил:

- количество переключателей должно быть минимально возможным;
- количество и траектории движения рук оператора должны быть сведены к минимуму;
- при необходимости работы двумя руками необходимо стремиться к тому, чтобы движения оператора были симметричными и синхронными.

Органы ручного управления и индикации на пультах и терминалах следует располагать так, чтобы оператору не приходилось скрещивать или менять руки; было удобно считывать показания приборов и пользоваться одновременно органами управления; разделить функции, выполняемые правой и левой руками в отдельности; наиболее часто используемые и аварийные органы управления и индикации размещались в зонах наибольшей доступности и обзора.

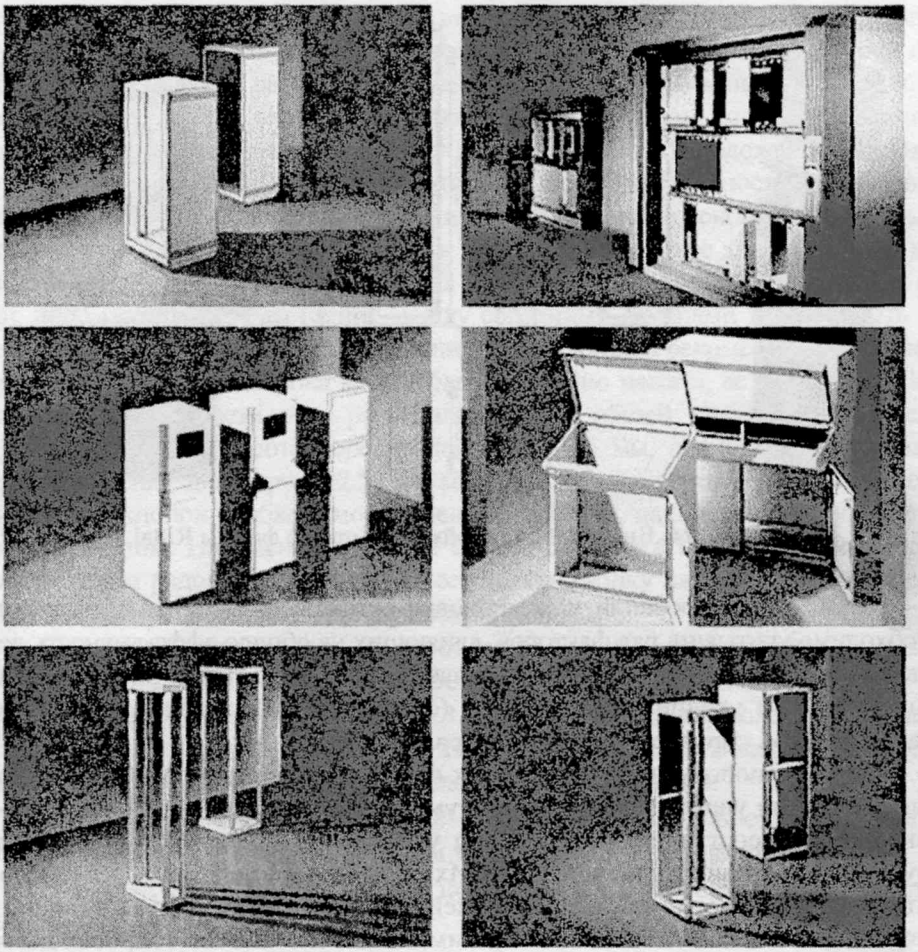


Рис. 12.23. Примеры конструкций стоек ЭА фирмы Rittal [37]

При размещении за пультом управления двух операторов ширина рабочего места каждого из них должна быть не менее 800...1000 мм. Примеры конструкций стоек ЭВМ и систем приведены на рис. 12.23.

При проектировании терминальных систем (банкоматов, терминалов управления и т. п.) следует уделять внимание как соответствию размеров антропометрическим характеристикам человека-оператора, так и требованиям по дизайну. Такие системы могут быть интегрированы как в конструкцию стойки (рис. 12.24), так и выполнены в виде выносных пультов управления (рис. 12.25).

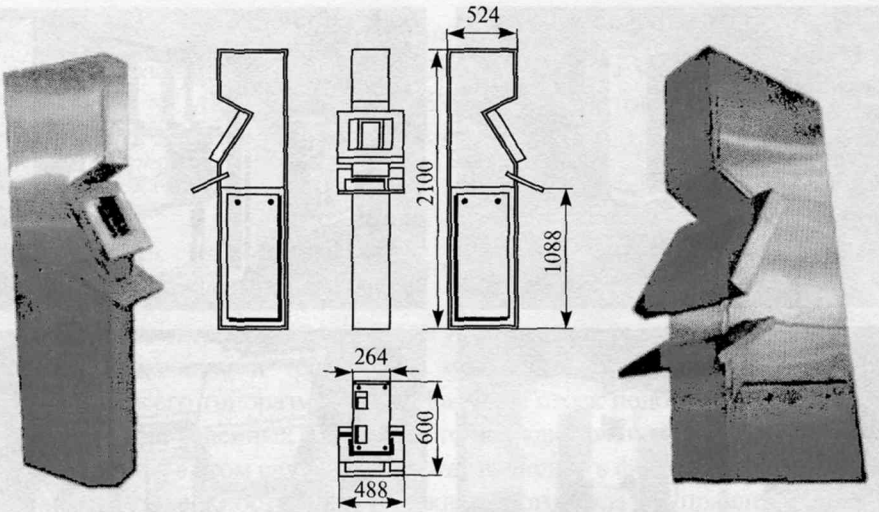


Рис. 12.24. Внешний вид стойки-терминала фирмы Rittal

При конструировании и компоновке органов управления и индикации необходимо учитывать ряд факторов, влияющих на общую эффективность действий оператора: размеры органов управления, их форму, цвет, расположение, направление и усилие переключения (срабатывания), траекторию перемещения органов управления, контроля, связи и т. п.

При компоновке вычислительных систем в виде стоек и пультов основными органами управления являются: тумблеры, кнопки, клавиши. Кнопки — наиболее распространенные элементы управления — имеют, как правило, круглую или прямоугольную форму. Их поверхность рекомендуется выполнять вогнутой с закругленной верхней кромкой. Минимальный диаметр кнопок должен быть не менее 12,5 мм. Нажатие кнопки сопровождается преодолением упругого сопротивления, незначительного вначале, но быстро нарастающего и заканчивающегося щелчком, указывающим на состоявшееся переключение. Перемещение кнопок при нажатии должно осуществляться на одинаковую глубину 3...12 мм (для часто используемых кнопок 3...5 мм, для редко используемых 6...12 мм), максимальное усилие сопротивления должно составлять примерно 10 Н. Расположение кнопок на пульте управления определяется их

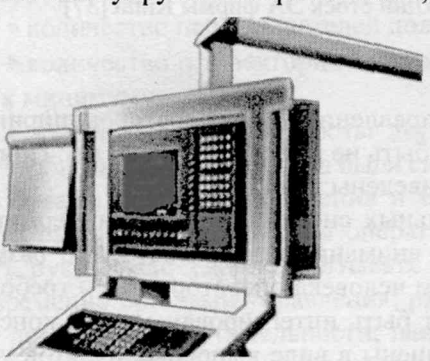


Рис. 12.25. Выносной терминал

функциями. В основной рабочей зоне помещают кнопки для ввода информации и управления режимами работы. Кнопки включения и выключения ЭА или отдельных ее устройств располагают вне основной рабочей зоны, чтобы исключить возможность их случайного нажатия. При большом количестве кнопок применяют их группировку и окраску в разные цвета. Расположение кнопок в группе должно соответствовать естественной последовательности выполнения операций. Если нумерация кнопок отличается короткой и ясной цикличностью, их следует помещать вплотную друг к другу. При этом все кнопки можно нажимать одной рукой. Кнопки для ввода цифровой информации группируют по три, либо по четыре. Расстояние между соседними группами должно быть не менее диаметра одной кнопки, соседние группы кнопок рекомендуется красить в разные цвета. Если кнопка может быть случайно нажата, ее надо ограждать приподнятым ободком или располагать ниже общей поверхности панели (предпочтительная высота перегородок равна 2,5 мм, диаметр отверстия под скрытую кнопку диаметром 12,5...18 мм). Для обозначения функционального назначения кнопок необходимо применять символы, надписи, окраску определенным цветом. Надписи и символы можно располагать как на поверхности кнопок, так и рядом с посадочным местом под кнопку на поверхности панели управления строго над соответствующими кнопками.

Тумблеры как правило, бывают двух-, трех- и четырехпозиционные. Длина рычага тумблеров — 9...50 мм, угол перемещения рычага — 40...120°, диаметр конца рычага — 3...15 мм. Усилие переключения рычага тумблеров не должно превышать 7 Н. При установке тумблеров на панель управления следует придерживаться следующих положений:

- установка в горизонтальные ряды предпочтительней установки в вертикальные ряды, так как при этом уменьшается вероятность ошибки;
- шаг установки должен быть не менее 12 мм по горизонтали и достаточным, чтобы обеспечить 20 мм между рычагами по вертикали при условии, что их переключение происходит по вертикали.

Для монтажа телекоммуникационного, сетевого и серверного оборудования используют специализированные конструкции (рис. 12.26). Основными требованиями к таким стойкам являются: функциональность, модульность, эргономичность и надежность. При этом они должны обладать достаточно высокой

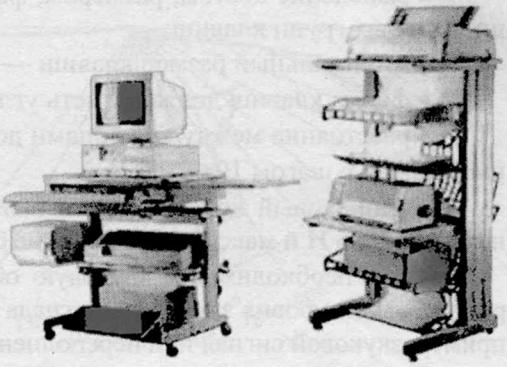


Рис. 12.26. Стойки для размещения ПЭВМ и периферийного оборудования

прочностью, что достигается использованием каркасов из металла. Роликовые узлы обеспечивают плавный, скользящий ход различных элементов конструкций. Столешницы изготавливают, как правило, из ДСП с устойчивым меламиновым покрытием, при этом они должны соответствовать европейскому гигиеническому разряду E1. Необходимо предусматривать возможность установки дополнительных навесных элементов, что позволяет разместить на компактных компьютерных стойках практически все оборудование, необходимое для создания полноценного рабочего места любого назначения.

Проектирование клавиатур

В типовой клавиатуре для PC/AT можно выделить пять основных групп клавиш: клавиши стандартной пишущей машинки; функциональные клавиши; служебные клавиши; клавиши управления курсором; цифровые клавиши. В зависимости от функционального назначения клавиатуры в ее составе могут быть различные функциональные группы клавиш, а также и специальные средства индикации, управления и авторизации доступа.

С точки зрения требований эргономики конструкция клавиатуры должна предусматривать:

- исполнение в виде отдельного устройства с возможностью свободного перемещения;
- опорное приспособление, позволяющее изменять угол наклона поверхности клавиатуры в пределах от 5 до 15°;
- высоту среднего ряда клавиш не более 30 мм;
- расположение часто используемых клавиш в центре, снизу и справа, редко используемых — вверху и слева;
- выделение цветом, размером, формой и местом расположения функциональных групп клавиш;
- минимальный размер клавиш — 13 мм, оптимальный — 15 мм;
- форма клавиш должна иметь углубление в центре;
- расстояние между клавишами должно быть не менее 3 мм, размещение клавиш с шагом 19±1 мм;
- одинаковый ход для всех клавиш с минимальным сопротивлением нажатию 0,25 Н и максимальным — не более 1,5 Н;
- при необходимости звуковую обратную связь от нажатия клавиш с регулировкой уровня звукового сигнала и возможностью ее отключения (например, звуковой сигнал при переполнении буфера контроллера клавиатуры).

Среди различных конструкций клавиатур можно выделить: стандартную клавиатуру (рис. 12.27, *а*), клавиатуру с выделенной группой функциональных клавиш (рис. 12.27, *б*), клавиатуру со встроенными средствами ав-

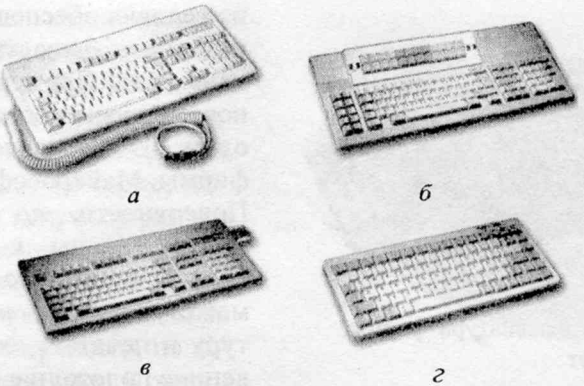


Рис. 12.27. Примеры внешнего вида клавиатур

торизации доступа с использованием магнитных карт (рис. 12.27, *в*), клавиатуру без выделенных групп функциональных, цифровых клавиш и клавиш управления курсором (рис. 12.27, *г*).

Одним из основных функциональных элементов клавиатуры являются клавиши (рис. 12.28, *а*). Они должны быть спроектированы в таком положении, чтобы обеспечить оператору наибольшее удобство в работе. Если рассмотреть траекторию движения указательного пальца при неподвижном положении кисти руки (рис. 12.28, *б*), то можно отметить участок *А* между 25 и 55°, на котором усилие, развиваемое пальцем, минимально. При угле, близком к 55°, указательный палец встречает большой палец. На начальном участке траектории движения (0...25°) усилие, развиваемое пальцем, максимально. Поэтому плоскость клавиш и расположение кисти руки при работе на клавиатуре должны быть установлены

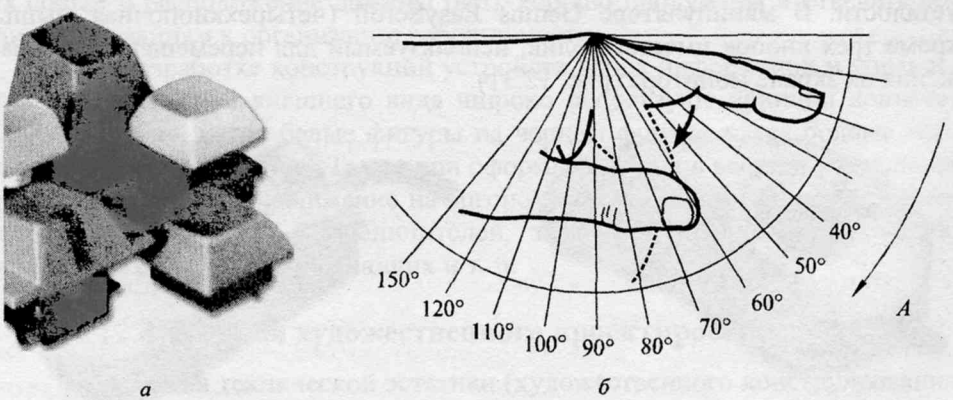


Рис. 12.28. Клавиши (*а*) и траектория движения пальца при нажатии на клавишу (*б*)

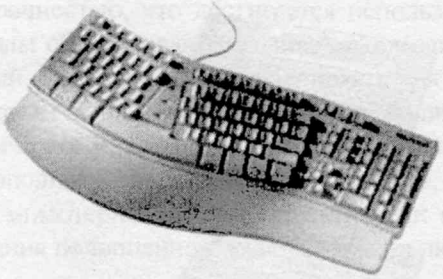


Рис. 12.29. Клавиатура фирмы Майкрософт

из условия обеспечения работы на начальном участке траектории движения. Примером эргономичного проектирования является один из вариантов клавиатуры фирмы Майкрософт (рис. 12.29). Поверхности, по которым движутся пальцы и расположение клавиш в ней такое, что оператор может положить руки на клавиатуру и печатать, сохраняя естественное положение кисти.

Манипуляторы

Для управления работой ЭА широко используют различные манипуляторы. Наиболее распространены манипуляторы типа «мышь» (далее просто мышь), которые конструктивно состоят из корпуса, соединительного кабеля (или инфракрасного порта) и кнопок управления. В основном применяют мыши с двумя или тремя кнопками. При разработке конструкции мыши следует учитывать тип подключения к ЭВМ, скорость обмена информацией, количество кнопок управления, тип устройства слежения (оптическое или механическое). Конструкция мыши должна быть такой, чтобы она свободно размещалась в ладони оператора, а для нажатия клавиш не требовалось дополнительное перемещение кисти его руки.

На рис. 12.30 приведен внешний вид манипулятора типа IntelliMouse®Trackball с шаровым управлением курсором и двумя кнопками, работа на которых позволяет держать руку неподвижно и избегать излишней усталости. В манипуляторе Genius EasyScroll (четырехкнопочная мышь) кроме трех кнопок имеется ролик, используемый для перемещения изображения на экране монитора (рис. 12.31).

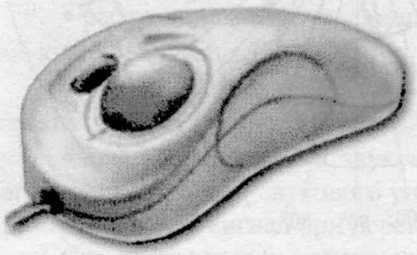


Рис. 12.30. Манипулятор IntelliMouse®-Trackball



Рис. 12.31. Манипулятор Genius EasyScroll

Стремление максимального приближения ЭВМ к человеку-оператору приводит к разработке новых видов манипуляторов и датчиков, воздействующих на все органы чувств: зрение, слух, обоняние, осязание, вкус. Уже получают распространение так называемые тактильные манипуляторы, использующие высокую чувствительность пальцев к неровностям поверхности, по которой они перемещаются. К такого рода устройствам относится так называемая «сенсорная панель» (TouchPad), внешний вид которой приведен на рис. 12.32. Положив палец на поверхность панели, оператор может управлять курсором так же, как при использовании мыши. Кнопки впереди и по бокам предназначены для выбора какого-либо вида меню или режима.



Рис. 12.32. Общий вид «сенсорной панели»

В общем случае при эргономичном проектировании и компоновке органов управления и ввода информации следует учитывать:

- взаимное расположение устройств отображения и ввода информации с учетом последовательности работы с ними, так чтобы органы зрения и управления человека двигались в одном направлении без резких скачков и зигзагов;
- при работе с несколькими устройствами ввода руки оператора не должны перекрещиваться;
- при работе двумя руками следует стремиться к тому, чтобы движения человека-оператора были симметричны и синхронны;
- при наличии нескольких разнесенных групп устройств управления их состав и расположение должны быть хорошо продуманы и отвечать общим требованиям к организации рабочих мест.

При разработке конструкций устройств ввода информации и управления для улучшения внешнего вида широко используют принцип «оптической иллюзии», когда белые фигуры на черном фоне кажутся больше черных фигур на белом фоне. Также при оформлении узлов ввода и управления необходимо обращать внимание на эргономичность и эстетичность вспомогательных элементов — соединителей, элементов крепления, проводов, опорных устройств, направляющих и т. п.

12.4. Основы художественного проектирования ЭА

Требования технической эстетики (художественного конструирования и компоновки) предъявляются к электронной аппаратуре, с которой в процессе работы непосредственно контактирует человек. В меньшей степени

этим требованиям должна отвечать транспортируемая ЭА, особенно бортовая. Это объясняется особой жесткостью эксплуатационных требований, предъявляемых к такому классу изделий, отсутствием человека-оператора (например, в непилотируемых космических объектах).

К общим требованиям технической эстетики относятся:

• *выразительность* — способность ЭА своим внешним видом наглядным образом отображать качество, обеспечивая соответствующее эстетическое восприятие;

• *оригинальность* — совокупность своеобразных элементов формы и их отношений, дающих возможность отличить данный вид аппаратуры от ряда однотипных. Понятие оригинальности не исключает, а предполагает сохранение определенных признаков формы: национальных, отраслевых, фирменных;

• *профессиональный стиль* — сохранение общепринятых в данной номенклатуре оборудования признаков формы: национальных, отраслевых, фирменных;

• *гармоничность* — свойство формы ЭА быть органично согласованной с элементами формы, что достигается определенными соотношениями яркости, цвета, размеров и расположением различных элементов. Требование гармоничности распространяется также на согласованность ЭА с помещением, где она эксплуатируется, в том числе когда аппаратура является частью ансамбля или функционально связанной системы;

• *современность стиля* — согласованность между общим стилем ЭА и уровнем развития стиля мира материальной культуры;

• *требование стилевого единства* предъявляют к признакам формы машины, которые отражают исторически сложившиеся социально-экономические и идейно-эстетические принципы, а также художественно-конструкторские методы и средства их воплощения.

Основные средства создания формы конструкции изделия — организация пространства, масштаб и пропорции объемов изделия, его силуэт и композиция — ритм его масс, плоскостей и опор, тектоническая структура, цвет и фактура использованного материала, отношение изделия к окружающей среде. Этими средствами художественное конструирование выявляет в облике изделия его назначение и принципы конструкторского решения и в то же время воплощает определенный комплекс идей и технических характеристик, которые связаны с назначением данного изделия, с той ролью, какую оно будет играть в общественной жизни.

Одним из основных понятий художественного конструирования изделий является *композиция* — построение целостного произведения, элементы которого находятся во взаимосвязи и гармоническом единстве. Основу композиции составляет объемно-пространственная структура изделия, отве-

чающая его назначению и выражаемая в характере взаимосвязи элементов формы изделия, взаимном расположении его частей, пропорциях, ритмическом строе элементов формы и т. п. Композиционной организации формы изделия достигают путем установления взаимосвязи и соподчинения образующих ее элементов. При этом главные и подчиненные элементы, взаимно усиливая друг друга, образуют в целом единство (табл. 12.20).

Таблица 12.20. **Виды композиционных схем [8, 15]**

Композиционная схема	Условное обозначение	Условное обозначение	Композиционная схема
Единство, сплоченность			Дробление, разделение, фрагментация
Равновесие, баланс			Неустойчивость, неуравновешенность
Симметрия			Асимметрия
Регулярность			Иррегулярность
Запутанность, сложность			Расчетливость, организация
Лаконичность, сдержанность			Преувеличение, гиперболизация
Предсказуемость			Спонтанность
Активность			Статичность, застой
Острота, тонкость, утонченность			Цельность, основательность
Нейтральность			Акцентированность
Слаженность, связность			Колебание, отклонение
Плоскостность			Глубина
Повторение, чередование			Случайность, эпизодичность
Простота, умеренность			Сложность, запутанность (навороченность)

Если форма изделия неоднородна или размеры его элементов не равны, то композиционное единство формы возникает, если средствами композиции обеспечивается соподчинение одних элементов другим. Например, при комплектации рабочего места с ПЭВМ дисплей занимает доминирующее положение, все другие элементы (обрамление, клавиатура) дополняют его общую форму, отражая единое композиционное целое. Если изделие состоит из трех частей, то средняя часть из-за своего центрального положения подчиняет себе обе боковые части. Усилить это соподчинение можно путем увеличения средней части. Главный элемент выделяют из соподчиненных элементов размерами, особым расположением приборов и органов управления, цветом, способом разбивки на составные части. К средствам композиции относят придающие изделию соразмерность и гармонию — масштабность, пропорциональность, ритм, контраст и нюанс, статику/динамику.

Форма — взаимосвязанная совокупность объемно-пространственных, фактурно-цветовых, конструктивно-технологических показателей, характеризующих качество ЭА. К основным свойствам формы относятся: геометрия строения, объемно-пространственная структура, прочность, весомость, плотность, динамичность, цветовой и световой колорит. Одной из важнейших характеристик формы является ее целостность, определяющая возможность мгновенной оценки структуры и качества изделия.

Масштабность — зрительно-пространственная характеристика размеров конструкции изделия. В основе масштабности лежит отношение части к целому, изделия в целом и его частей к окружающим предметам и их частям, а также к размерам человека. Характер масштабности обусловлен степенью расчлененности, деталировкой формы. В электронной аппаратуре, как и во многих промышленных изделиях, масштабные характеристики связаны с деталями, размеры которых строго обусловлены техническими и эргономическими требованиями. Например, рукоятки управления, клавиши, кнопки и т. п. имеют относительно постоянные размеры независимо от того, какой величины изделию они принадлежат. Такие элементы и детали носят название указателей масштаба. Выразительная масштабность изделия достигается лишь при соблюдении масштабных закономерностей: маленькая форма должна иметь крупные детали, а большая – относительно мелкие. В качестве примера можно указать на динамику масштабности размеров тела человека при его росте. Так, соотношение высоты головы и высоты тела у новорожденного ребенка 1:4, в 2 года — 1:5, в 5 лет — 1:6, в 12 лет — 1:7, у взрослого мужчины —1:8.

На масштабное восприятие формы изделий оказывают влияние зрительные иллюзии. Например, вертикальные формы кажутся длиннее равных им горизонтальных форм, квадрат зрительно производит впечатление прямоугольника. Ошибка в оценке высоты в связи с этим может достигать 35 %. Светлые

предметы, особенно белые, кажутся крупнее равных им темных предметов (явление иррадиации). Размещенный на более крупной панели прибор кажется мельче идентичного прибора, расположенного на мелкой панели.

Пропорциональность — соразмерность частей формы между собой и с целым. От удачно найденного соотношения конструктивных частей изделия зависит в значительной мере его композиционная целостность. При определении пропорциональных соотношений в промышленности нашли широкое применение основные ряды предпочтительных чисел R5; R10; R20; R40 и ряды нормальных размеров Ra5; Ra10; Ra20; Ra40. Большое распространение в природе и технике получили также пропорции, связанные с применением иррациональных величин. Прямоугольники с такими соотношениями размеров сторон образуют фигуры с соотношениями площадей 1:2; 2:3 и т. д.

Ритм — средство композиции, обеспечивающее выделение и связь элементов формы путем их повторения, чередования, нарастания, убывания. Ритм как средство гармонизации тесно связан с масштабным и пропорциональным строем изделия. Он способствует более четкому зрительному восприятию конструкции. Характер ритма обусловлен функцией и конструкцией изделия. Расположение блоков четкими рядами подчеркивает ритмичность конструкции. При установке шкафов (стоек) в линию ритм образуется створками (дверцами) шкафов.

Контраст — средство композиции, позволяющее активнее выразить функциональные и конструктивные особенности элементов. Средства контрастирования — цветовые и размерные решения. Те элементы, которые необходимо выделить из общей совокупности, имеют обычно отдельную, неповторяющуюся форму и окрашиваются в контрастирующие цвета.

Нюанс — незначительное различие элементов конструкции по форме, размерам и цвету (средство композиции, противоположное контрасту).

Симметрия — организация элементов конструкции, основанная на правильном их размещении вокруг центра или оси. Конструкции, не обладающие симметрией, обладают асимметрией. Симметричная композиция подчеркивает статичность изделия, асимметричная композиция — его динамичность.

Важное средство композиции — *цветовое решение* изделия (окраска). Умело применяя те или иные цвета, можно создавать впечатление легкости и тяжести, холода и тепла, простора и тесноты, выступания и отступания элементов и узлов изделия. Цвет также необходим для выявления нужных деталей, элементов или частей изделия и прежде всего опасных в отношении травматизма. Цвет является средством эстетического воздействия, влияя на настроение, поднимая и понижая эмоциональный тонус, вызывая ощущение творческого подъема. Кроме того, цвет способствует образному выражению сущности изделия,

обеспечивает его связь с окружающей средой. На рис. 7 цветной вклейки приведена диаграмма, характеризующая воздействие цвета на человека.

Для ЭА наиболее целесообразно применение гармонизирующих оттенков одного и того же цвета (например, черный, темно-серый, светло-серый или песочный, бежевый, оливковый и т. п.). Это не исключает применения там, где это необходимо, контрастирующих цветов, например красного — для сигнализации аварийных режимов работы, зеленого — для сигнализации нормального режима работы и т. д.

Гармоничность — свойство формы конструкции быть органично согласованной с элементами формы, что достигается определенным соотношением размеров, форм, яркости, цвета, расположения отдельных элементов. Требование гармоничности включает требование согласованности с помещением, где располагается конструкция.

Выразительность — способность конструкции своим внешним видом наглядно отображать качество, обеспечивая соответствующее эстетическое восприятие. Выразительности добиваются с помощью таких средств композиции, как целостность формы, композиционное равновесие, взаимодействия конструкции и пространства.

Оригинальность — совокупность своеобразных элементов формы и их отношений, позволяющая отличить конструкцию от однотипных. Это понятие предполагает наличие национальных, отраслевых фирменных признаков.

Стиль — это устойчивая общность формально-художественных средств, отражающая общие принципы и художественно-конструкторские методы и средства их воплощения. Примерами стилей являются: античный, готический, возрождения, рококо и т. п. Базовыми принципами являются: ориентация на человека, целесообразность, ясность, изящество, чистота и мажоритарный фон. Одной из важных характеристик стиля является его современность, т. е. согласованность между стилем конструкции и устоявшимися на данный момент образцами. Мода в отличие от стиля представляет собой менее устойчивую общность названных методов и средств.

Тектоника — зримое отображение работы конструкции и материала в форме, т. е. представляет собой связь формы и содержания. Различают тектонику штампованной, прессованной, литой, деревянной и т. п.

Фактура и пластика служат для создания нюансных способов отделки, для создания тонких контрастов, например, противопоставление матовой и полированной поверхности одного и того же материала.

Соотношение объема и пространства — свойство, позволяющее выделить наиболее важные композиционные элементы. При необходимости сосредоточить на чем-либо внимание взаимодействия объема и пространства в этом месте следует сделать более напряженным. Однако чрезмерное увеличение проникновения пространства в объем может соз-

дать впечатление незавершенности, которое отсутствует при ограничении пространства.

Соподчиненность — свойство, учитывающее при обеспечении выразительности композиции и целостности формы. Быстрота восприятия композиции во многом зависит от логичности и ясности связей пространственных элементов систем.

Зрительное равновесие композиции — это зрительная уравновешенность частей и целого относительно пространственных осей. Использование соподчинения и композиционной уравновешенности тесно связано с использованием пропорций, ритма, масштаба, симметрии, цветового колорита, контраста и нюанса.

Контрольные вопросы

1. Что такое эргономика и какие задачи она решает?
2. Охарактеризуйте роль человека-оператора в системе человек—машина.
3. Чем определяется время сенсомоторной реакции человека?
4. Как необходимо учитывать антропометрические параметры человека-оператора при проектировании ЭА?
5. Какие параметры органов зрения необходимо учитывать при проектировании эргономичной ЭА?
6. Какие параметры органов слуха необходимо учитывать при проектировании эргономичной ЭА?
7. Какие параметры опорно-двигательной системы необходимо учитывать при проектировании эргономичной ЭА?
8. Какие требования с позиции эргономики предъявляются к организации рабочих мест по уровню освещенности?
9. Какие требования с позиции эргономики предъявляются к организации рабочих мест по уровню виброакустического воздействия?
10. Какие требования с позиции эргономики предъявляются к организации рабочих мест для работы с оборудованием, размещенным в стойках?
11. Какие требования с позиции эргономики предъявляются к организации управления и индикации?
12. Перечислите значения параметров, определяющих нормальные условия работы человека-оператора.
13. Назовите виды оценки художественно-конструкторских показателей ЭА.
14. Что вы понимаете под термином «Эргодизайн ЭА»?
15. Почему важна правильная организация рабочего места?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методология конструкторско-технологического проектирования ЭА продолжает совершенствоваться, и пути ее развития связаны, во-первых, с внедрением ЭА во все сферы человеческой деятельности, во-вторых, с ростом степени интеграции применяемой элементной базы и, прежде всего, микроэлектронной и, в-третьих, исчезновением четких границ между системотехническим, схемотехническим, конструкторским и технологическим проектированием ЭА. Эти три тенденции не новы — они характерны для развития такого наукоемкого раздела науки и техники последние двадцать-тридцать лет (по существу, с момента появления микропроцессоров). По мнению авторов, эти тенденции будут иметь место и всемерно совершенствоваться в дальнейшем развитии электронного аппаратуростроения, по крайней мере, до тех пор, пока хранимая, перерабатываемая и передаваемая информация будет представляться в виде электрических сигналов.

Встраивание ЭА в существующие типы конструкций машин, приборов и оборудования (управляемых объектов) ставит перед конструкторами и технологами задачу конструктивной совместимости, которая может быть решена двумя путями. Первый путь предполагает адаптацию конструкции ЭА под управляемые ею объекты. Второй путь заключается в адаптации конструкции управляемых объектов под унифицированную и стандартизованную конструкцию ЭА. Как показывает практика разработки ЭА, используют оба пути решения, хотя второй и кажется менее реальным. В пользу второго варианта решения проблемы говорит тот факт, что огромное число конструкторско-технологических решений ЭА снижает эффективность их применения: замедляет темпы разработки, производства и внедрения, снижает серийноспособность и качество, повышает стоимость и т. д.

Внедрение ЭА в различные отрасли хозяйства создает предпосылки для межвидовой унификации машин, приборов, оборудования, которая должна удовлетворять следующим требованиям:

- вариантность по физическим и электрическим параметрам;
- гармоничное сочетание различных конструктивных единиц без дополнительных расходов на стыковку;
- вариантность и адаптируемость к различным условиям эксплуатации;

- соответствие международным стандартам;
- технологическая независимость.

Степень интеграции применяемой в ЭА элементной, микроэлектронной базы будет сохранять в последующие годы устойчивую тенденцию к увеличению. В ближайшие годы, как показывают данные табл. 3.1, следует ожидать появления в ЭВМ микропроцессоров с тактовой частотой 2...3 ГГц, числом транзисторов в кристалле 0,2...1,5 млн. Микросхемы памяти достигнут емкости 16...256 Гбит при той же тактовой частоте. Первые успехи достигнуты в новом направлении развития микроэлектроники — наноэлектронике (см. рис. 1 цветной вклейки).

Таблица 3.1. **Прогноз развития микроэлектронных технологий**

Характеристика микроэлектронной технологии	Годы					
	1999	2001	2003	2006	2009	2012
Минимальный топологический размер, нм	180	150	130	100	70	50
Емкость ДЗУПВ, бит	1Г	1...4Г	4Г	16Г	64Г	256Г
МП, транз./кристалл	21М	40М	76М	200М	500М	1400М
Тактовая частота, МГц	1200	1400	1600	2000	2500	3000
Количество слоев металлизации	6...7	7	7	7...8	8...9	9
Минимальное количество масок	22/24	23	24	24/26	26/28	28
Размер кристалла ДЗУПВ, мм^2	400	450	560	790	1120	1560
Размер кристалла МП, мм^2	340	380	430	520	620	750
Размер кристалла СпИС, мм^2	800	850	900	1000	1100	1300
Максимальный диаметр пластин, мм	300	300	300	300	400	400

Примечание. МП — микропроцессор; СпИС — специализированные интегральные схемы.

Рост степени интеграции микросхем и, следовательно, рост их функциональной сложности неизбежно приводит к увеличению удельной мощности тепловыделения, электромагнитному взаимовлиянию, плотности компоновки ЭА в целом. Это ставит перед конструкторами и технологами качественно новые задачи по обеспечению надежной работы ЭА и строящихся на них систем. Так, например, проблему отвода тепла от БИС микропроцессора уже не решить установкой индивидуального вентилятора. Необходимы другие, более эффективные решения, например, применение миникриогенных устройств. С повышением степени интеграции микросхем возрастает сложность «проблемы выводов», решение которой невозможно без совместной работы конструкторов и технологов. Можно привести еще большее количество проблем, решение которых потребует в ближайшие годы усилий разработчиков ЭА, в том числе конструкторов и технологов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев В.Г.* и др. Технология ЭВА, оборудование и автоматизация. М.: Высшая школа, 1984.

2. *Алексеев В.Г., Лукин К.Б., Напалков Э.С.* Алгоритмизация проектирования технологических процессов производства ЭВА и РЭА. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1985.

3. *Белов П.Г.* Теоретические основы системной инженерии безопасности. М: ГНТП «Безопасность», МИБ СТС, 1996.

4. *Билибин К.И., Гриднев В.Н.* Проектирование маршрутных и операционных технологических процессов в технологии приборостроения. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1987.

5. *Билибин К.И.* и др. Ленточные провода и кабели в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Радио и связь, 1984.

6. *Буловский П.И.* и др. Проектирование и оптимизация технологических процессов и систем сборки радиоэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1989.

7. *Бушминский И.П.* и др. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры / Под ред. А.П. Достанко, Ш.М. Чабдарова. М.: Радио и связь, 1989.

8. Введение в эргономику / Под ред. В.П. Зинченко. М.: Советское радио, 1974.

9. *Власов А.И.* Современное состояние и тенденции развития теории и практики активного гашения волновых полей. // Приборы и системы управления. 1997. № 11. С.59—70.

10. СанПиН 2.2.2.542—96. Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы: Санитарные правила и нормы. М.: Информационно-издательский Центр Госкомсанэпиднадзора России, 1996.

11. *Глудкин О.П.* Методы и устройства испытаний РЭС и ЭВС. М.: Высшая школа, 1991.

12. *Дмитров В.Н.* Опыт внедрения CALS за рубежом и в России. // Автоматизация проектирования. 1997. № 3.

13. Единая система конструкторской документации: Справочное пособие. М.: Издательство стандартов, 1989.

14. Единая система технологической документации: Справочное пособие. М.: Издательство стандартов, 1992.

15. *Еланцев А.В.* и др. Правила оформления конструкторской документации электронной аппаратуры. Методические указания к дипломному проектированию. В 2-х ч. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1994.

16. *Зинченко В.П.* Эргономика и информатика. // Вопросы философии, 1986. № 7.

17. *Коледов Л.Я.* Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок. М.: Радио и связь, 1989.

18. *Львович Я.Е., Фролов В.Н.* Теоретические основы конструирования, технологии и надежности РЭА. М.: Радио и связь, 1986.

19. Методы и критерии оценки функционального комфорта. М.: ВНИИТЭ 1978.

20. *Мюллер С.* Модернизация и ремонт персональных компьютеров. М.: Восточная Книжная Компания, 1996.

21. *Ненашев А.П.* Конструирование радиоэлектронных средств. М.: Высшая школа, 1990.

22. *Павловский В.В., Васильев В.И., Гутман Т.Н.* Проектирование технологических процессов изготовления РЭА. М.: Радио и связь, 1982.

23. *Парфенов О.Д.* Технология микросхем. М.: Высшая школа, 1986.

24. *Парфенов О.Д.* Расчет и конструирование интегральных транзисторов. Методические указания к курсовому проектированию по курсу «Микроминиатюризация электронно-вычислительных средств». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1994 г. и 1998 г.

25. *Преснухин Л.Н., Шахнов В.А.* Конструирование электронных вычислительных машин и систем. М.: Высшая школа, 1986.

26. Справочник технолога-приборостроителя. В 2 т. / Под ред. П.В. Сыроватченко. М.: Машиностроение, 1980.

27. *Ступаченко А.А.* САПР технологических операций. Л.: Машиностроение, 1988.

28. *Ушаков Н.Н.* Технология производства ЭВМ. М.: Высшая школа, 1991.

29. *Фрум Д.* CALS-технологии как основа вхождения разных стран в 21-й век. Материалы семинара APLS. Лондон, 1996.

30. *Ханке Х.-И., Фабиан Х.* Технология производства радиоэлектронной аппаратуры: Пер. с нем. / Под ред. В.Н. Черняева. —М.: Энергия, 1980.

31. *Чайнова Л.Д.* Функциональный комфорт. Компоненты и условия формирования. Техническая эстетика, № 1, 1983 г. С. 21—23.

32. *Чернышев А.А.* Теоретические основы конструирования и надежности электронных средств. М.: Радио и связь, 1998.

33. Эргономика в определениях. М.: ВНИИТЭ, 1980.

34. *Янг М.* Visual C++ 4 для профессионалов. М.: ЭНТРОП, 1977.

35. Bullinger Hans-Jorg: Ergonomie: Product - und Arbeitsplatzgestaltung. Stuttgart: Teubner, 1994.

36. CALS. Jarl S. Magnusson Torbjorn Holm. Stockholm, 1996.

37. http://www.ixbt.com.

38. http://www.rittal.de.

Рабочее место человека-оператора 487
Радиационные факторы 35, 41
Регулировка ЭА 412
Резервирование 138
Ресурс ЭА 133

Сборочная единица 181
Средняя наработка на отказ 135
Стандартизация 59
Схема 25
- структурная 26
- функциональная 27
Схемная документация 25

Теплопроводность 110
Технические условия 20
Технический проект 15
Техническое задание 14
Технологическая документация 21
Технологическая инструкция 24
Технологическая подготовка производства 15
Технологический процесс 12, 182, 184
Технологичность 34, 186
Технология производства 12
- сборочная 15
Типовой элемент замены 55
Толстопленочная технология 257, 264
Тонкопленочная технология 249
Топология 223
Точность параметров ЭА 199

Условное графическое обозначение 27, 28
Устойчивость конструкции 84

Формообразование 344
Фотолитография 236, 255
Фотошаблон 223, 307

Художественное конструирование 516

Человеко-машинная система 467, 469
Человеческий (субъективный) фактор 464

Экранирование 124, 128, 131
Электронная аппаратура 8, 9
Электрорадиоэлемент 109
Эргодизайн 464, 466
Эргономика 464
Эскизный проект 14

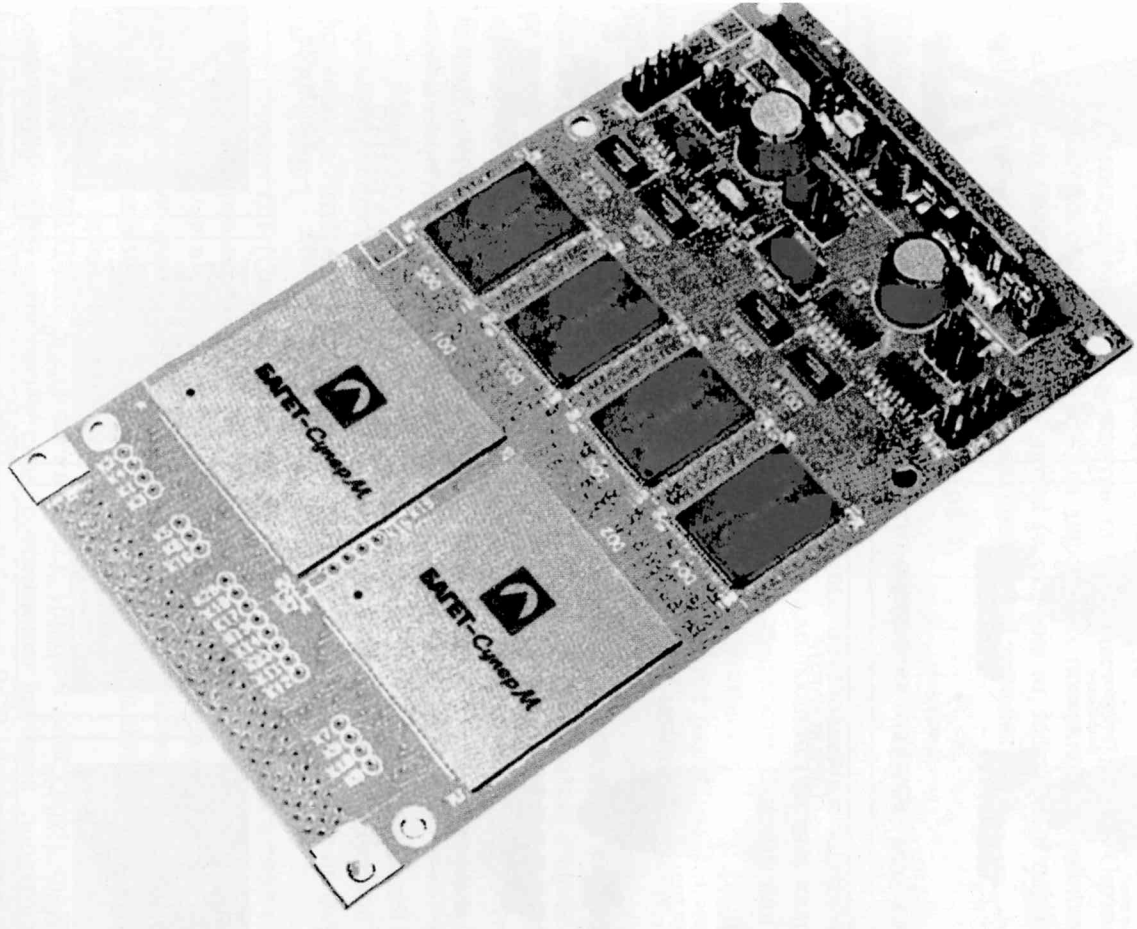


Рис. 2. Микропроцессорный модуль вычислительного комплекса «Эльбрус-90 микро»

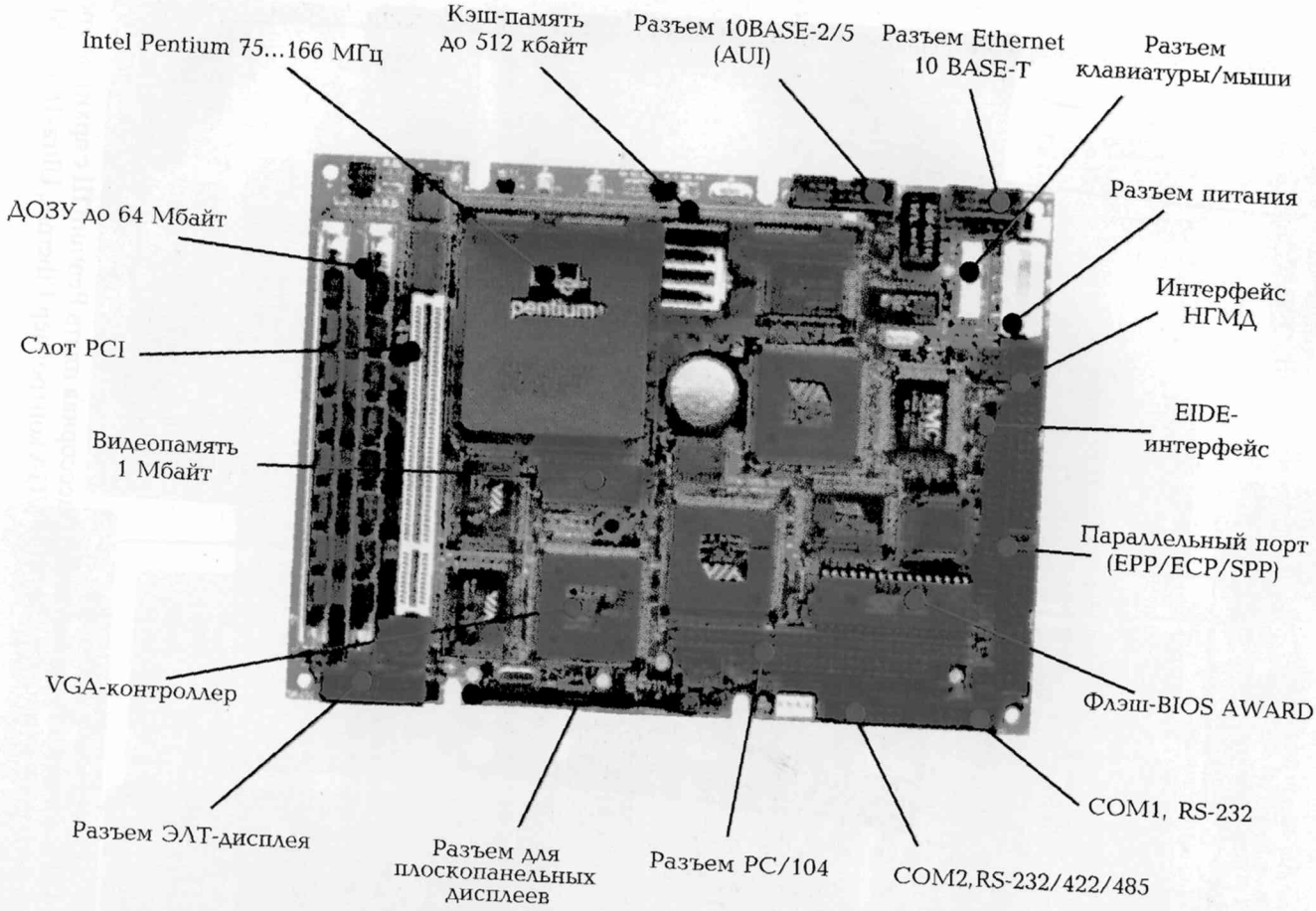


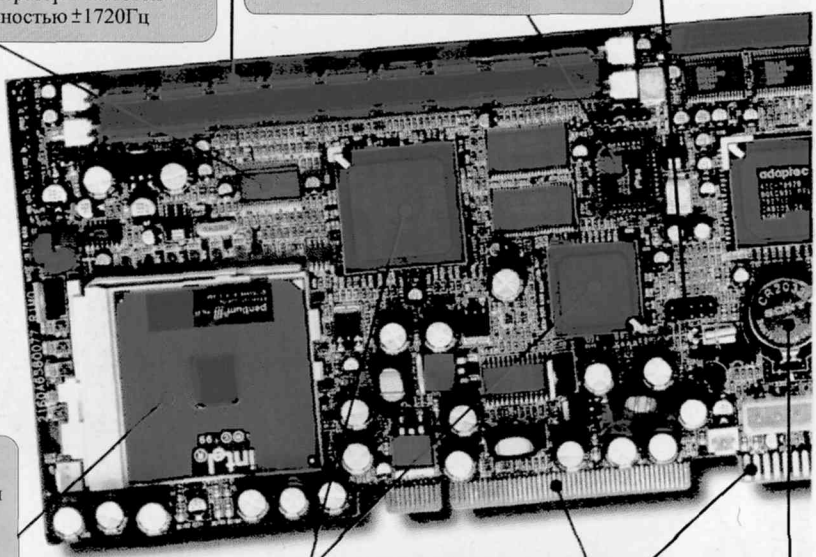
Рис. 3. Конструкция одноплатного компьютера PCM-5860 [СТА 1997. №1]

Память
- Объем — от 16Мб до 512Мб
- 168-контактные модули
- Поддержка до 2 модулей DIMM
- 64-битная SDRAM, соответствующая стандарту PC100
- Поддерживает SPD интерфейс

Шина USB
- USB 2.0 Host Controller
- Может быть блокирована через BIOS

Часы реального времени
- Motorola MC146818A
- 256 байт RAM, питается от встроенной батареи
- Гарантированный срок службы батареи до 7 лет
- Встроенный генератор с частотой 14.318МГц, точностью ±1720Гц

BIOS
- AMI Hi Flex BIOS
- Соиместим со стандартом ACPI
- Поддерживает функцию Plug and Play
- Возможность программного обновления
- Отсутствует проблема Y2K



Процессоры
- Поддерживается процессор Intel Pentium III счастотой до 600 МГц в корпусе FC-PGA с разъемом Socket 370
- Поддерживаетя процессор Celeron с частотой до 600МГц в корпусе P-PGA с разъемом Socket 370

Системный чипсет
- Intel 810E AGP
- 82810E Graphics and Memory Controler Hub (GMCH)
- 82801 I/O Controller Hub (ICH)
- 82802 Firmware Hub (FWH)
- Поддерживает SPD интерфейс

Системные шины
- Шина ISA (8.33МГц) с повышенной нагрузочной способностью до 64мА
- Шина PCI (33МГц) соответствует стандарту PCI Rev. 2.2
- Порцессорная шина (FSB), работающая на частоте 100/133 МГц

Батарея CMOS
- 3В литиевая батарея с цепью диодной защиты
- Ресурс не менее 5 лет

Рис. 4. Высокоинтегрированная процессорная плата Pentium III с архитектурой Socket 370 (Intek 810E Chip Set, AGP VGA контроллер Ethernet, Ultra-160 SCSI контроллер)

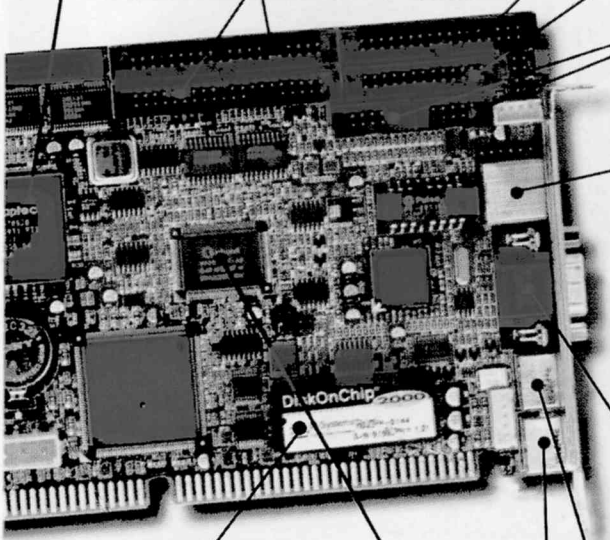
Контроллер SCSI
- Контроллер adaptec AIC-7892 Ultra-III SCSI
- Скорость передачи до 160 Мб/с
- 68-контактный LVD разъем

Контроллер FDD
- Поддерживает дисководы 1.44 Мб, 1.2 Мб, а также LS-120 HD
- Может быть блокирован через BIOS

Параллельный порт
- Параллельный двунаправленный порт
- Поддерживает расширенные режимы EPP и ECP
  26-контактный разъем под плоский кабель
- Может быть блокирован через BIOS

Контроллер EIDE
- Поддерживает до 4 HDD
- Поддерживает PIO mode 4 со скоростью передачи до 14 Мб/с
- Поддерживает Ultra DMA/66 (66 Мб/с)
- Поддерживает Ultra DMA/33 (33 Мб/с)
- Поддерживает загрузку CD-ROM (ATAPI)

Два последовательных порта
- Контроллер совместим с UART 16550
- Буферы FIFO по 16 байт на прием и передачу
- Скорость передачи до 115.2 кбод



Контроллер Ethernet 10/100
- Контроллер Intel 82559 PCI Fast Ethernet
- Разъем RJ-45, расположенный на монтажной скобе
- Режимы полного и полудуплексного обмена со скоростью 10 Мбит/с и 100М бит/с в соответствии с IEEE 802.3
- Может быть блокирован, при этом освобождаются соответствующие системные ресурсы

Графический контроллер
- 4Мб высокоскоростной 32-битной RAM
- Стандартный разъем DB15
- Разрешение — 1600x1200 точек при 256 цветах
- Может быть блокирован переключателем

Разъем для DiskOnChip
- Может быть блокирован переключателем
- Поддерживает Flash disk объемом до 144 Мб

Интегрированный аппаратный мониторинг
- Контроль вторичных напряжений питания с точностью до 16 мВ с программной установкой пороговых значений
- Контроль скорости вращения двух вентиляторов, контроль температуры в двух точках
- Возможность подключения микросхемных температурных датчиков
- Звуковая сигнализация отказов

Мышь PS/2
- Разъем типа mini-DIN (6-контактный)
- Microsoft совместима
- Питание мыши осуществляется через самовосстанавливающийся предохранитель
- Может быть блокирована через BIOS

Контроллер клавиатуры PS/2
- Разъем типа mini- DIN (6-контактный)
- Питание клавиатуры осуществляется через самовосстанавливающийся предохранитель

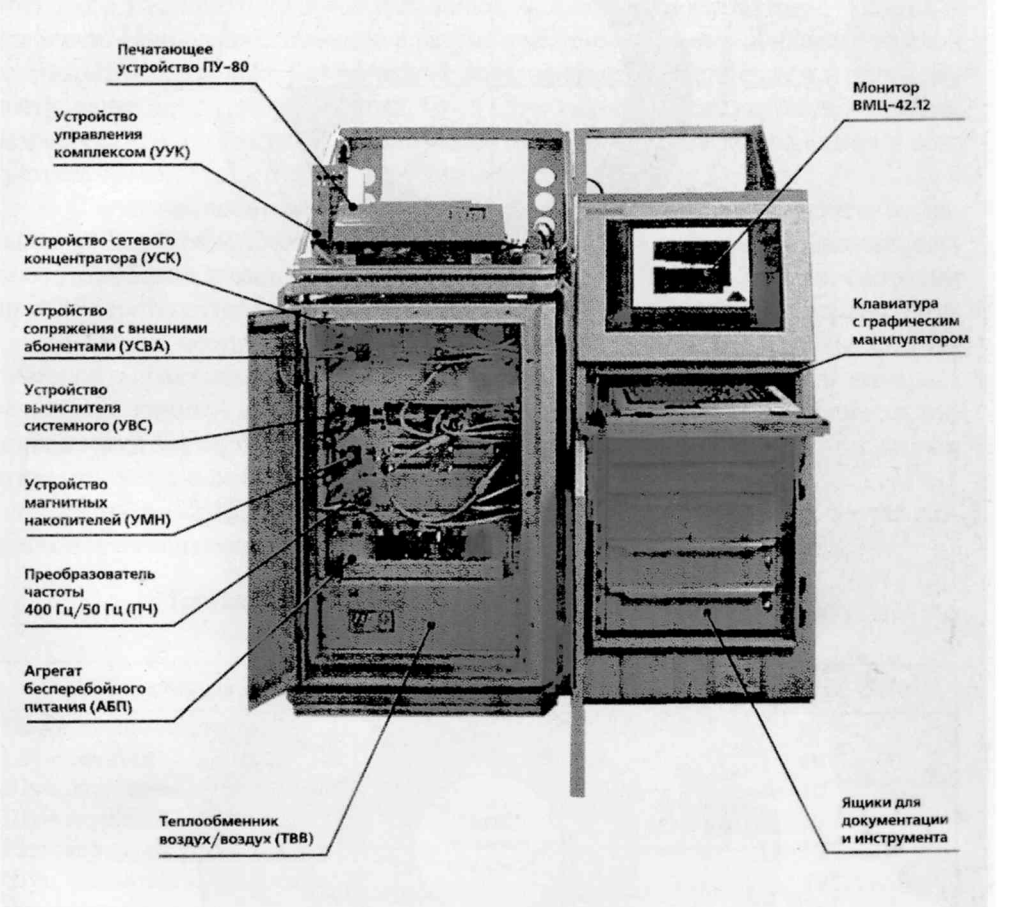


Рис. 6. Вычислительный комплекс «Эльбрус-90 микро»

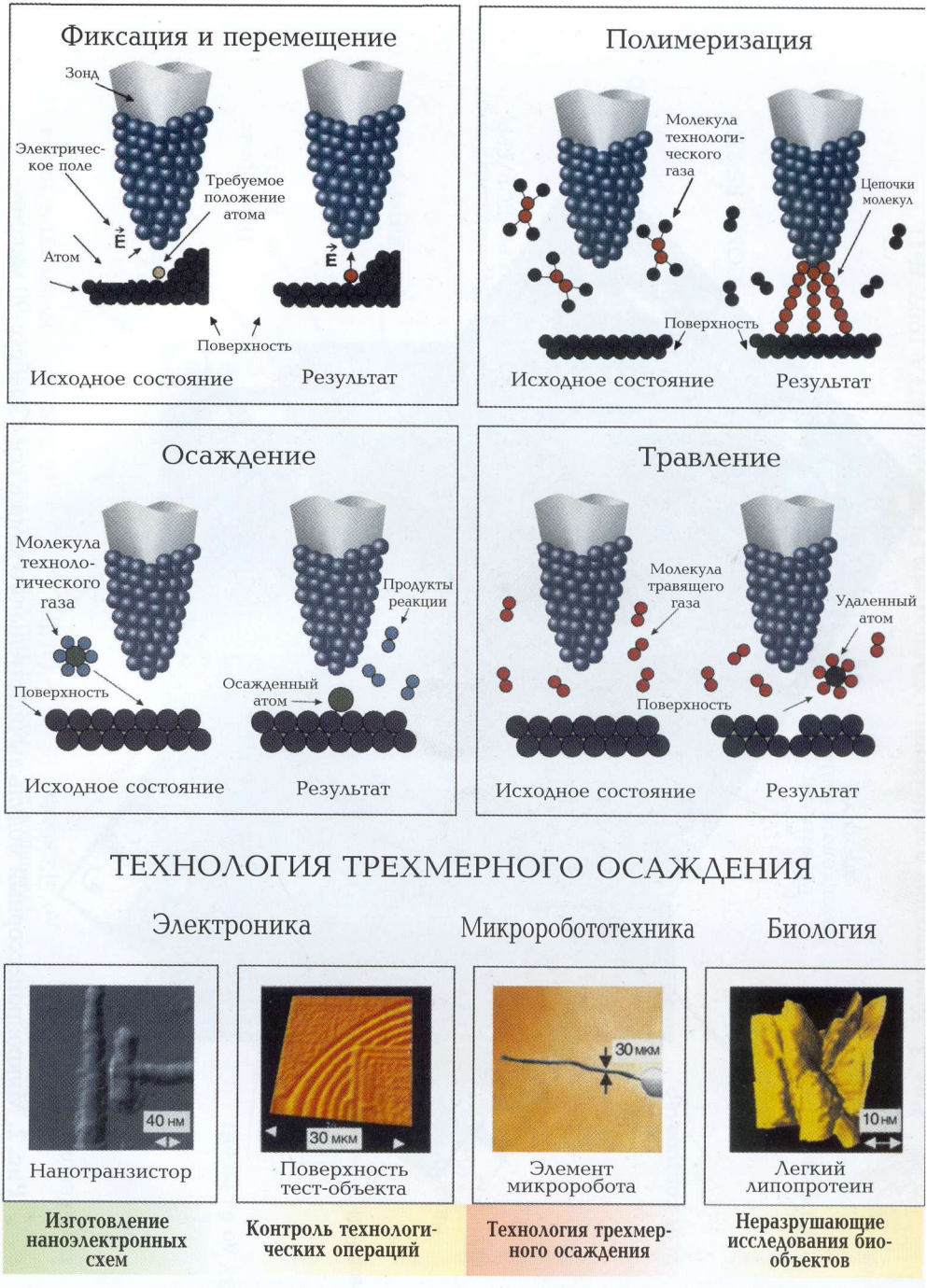


Рис.1. Нанотехнологические процессы [Центр нанотехнологий международного фонда конверсий]

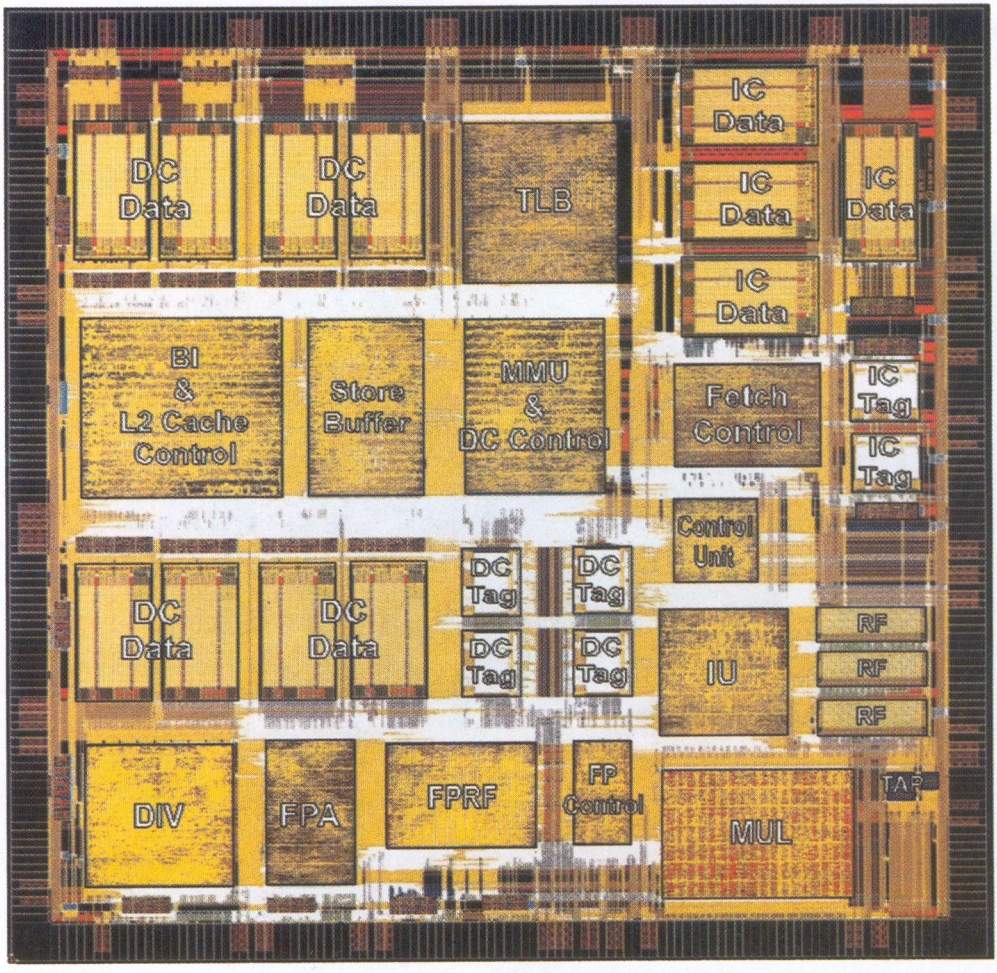


Рис. 5. Топология кристалла микропроцессора «Багет — Супер М»: тактовая частота — 150 МГц; количество транзисторов — 2,8 млн; площадь кристалла — 10×10 мм^2; рассеиваемая мощность — 3,5 Вт

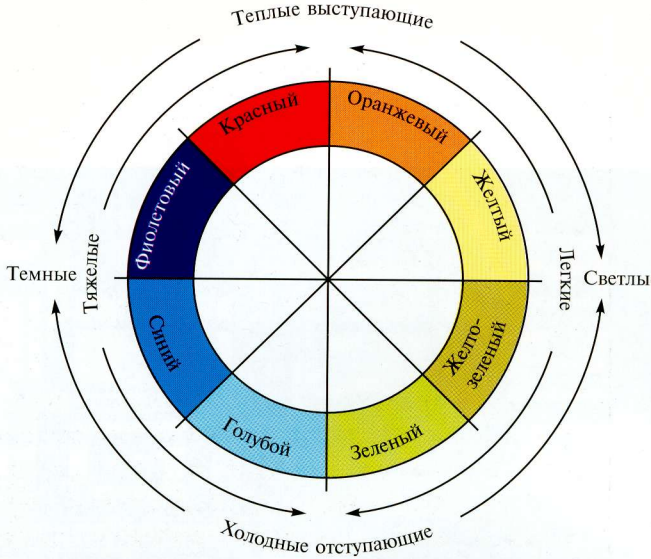


Рис. 7. Цвет и его восприятие человеком

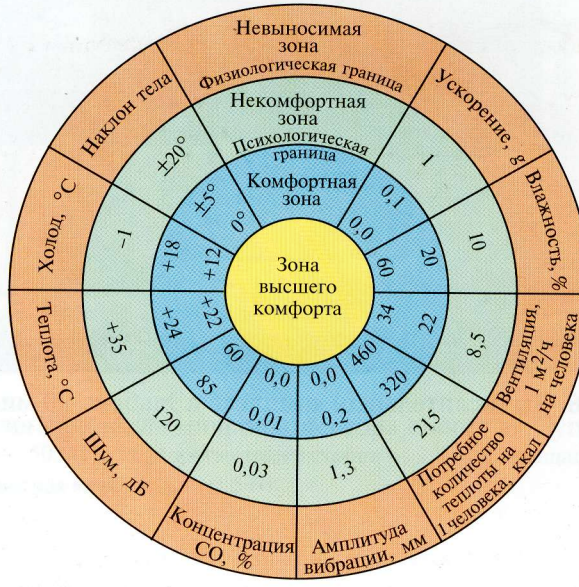


Рис. 8. Номограмма определения комфортных условий работы

Учебное издание

Информатика в техническом университете

Билибин Константин Иванович
Власов Андрей Игоревич
Журавлева Людмила Васильевна
Мысловский Эдуард Викентьевич
Парфенов Олег Дмитриевич
Пирогова Елена Вячеславовна
Шахнов Вадим Анатольевич
Шерстнев Вячеслав Викторович

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Редактор *Н.Е. Овчеренко*
Художники *В.Н. Константинов, С.С. Водчиц*
Корректор *Л.И. Малютина*
Компьютерная верстка *С.Ч. Соколовского*

Подписано в печать 14.08.02. Формат 70×100/16. Печать офсетная.
Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печ. л. 33 + 0,5 цвет. вклейка.
Усл. печ. л. 43,55. Уч.-изд. л. 42,05.
Тираж 3000 экз. Заказ 6721

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

Отпечатано с оригинал-макета в ГУП ППП «Типография «Наука».
121099, Москва, Шубинский пер., 6.